

7. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Н.В. Шаров. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2004. 353 с.
8. Спиридонов М.А., Девдариани Н.А., Калинин А.В. и др. Геология Белого моря // Сов. геология. 1980. № 4. С. 45–55.
9. Карта новейшей тектоники СССР и сопредельных территорий. М-б 1:5000000/Н.И. Николаев. Л.: ВСЕГЕИ, 1980.
10. Карта геоморфолого-неотектонического районирования Нечерноземной зоны РСФСР (за исключением горной части Урала, Зауралья и Калининградской области). М-б 1:1500000/В.И. Бабак. М.: Изд-во МГУ, 1980.
11. Методы моделирования в структурной геологии. М.: Недра, 1988, 222 с.
12. Шатский Н.С. Большой Донбасс и система Вичита. Сравнительная тектоника древних платформ. Ст. 2. М.: Наука, 1964. Т. 2. Избр. тр. С. 426–458.

Геологический институт РАН,
ВНИИ Геофизика,
Институт динамики геосфер РАН

Поступила в редакцию
26.12.2005

GEOMORPHIC MANIFESTATION OF HORIZONTAL SPLIT MORPHOSTRUCTURES IN NORTH KARELIA

D.S. ZYKOV, JU.K. SCHUKIN, V.G. SPUNGIN, A.I. IOFFE

S u m m a r y

Deep, long, and narrow depression of Lake Paanaiarvi represents the geomorphic anomaly for the North Karelia. The depression is situated at the intersection of two large neotectonic faults bounding the block of the earth crust. This block lies in the zone of influence of Kandalaksha graben. According to the position of Lake Paanaiarvi's depression the latter may be interpreted as the split that was formed due to drifting apart of the boundaries of the extension zone around Kandalaksha graben.

УДК 551.435:631.459(470.321)

© 2007 г. Ю.С. КУЗНЕЦОВА, В.Р. БЕЛЯЕВ, М.В. МАРКЕЛОВ, Н.Н. ИВАНОВА

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПАХОТНОМ СКЛОНЕ (ЧАСТЬ 1)¹

Постановка проблемы

Эрозия почв представляет собой один из наиболее интенсивных экзогенных процессов на территориях равнин умеренного климатического пояса, что обуславливает необходимость ее учета в фундаментальных исследованиях, как одного из ведущих составляющих общей денудации суши. В то же время, с ней связан ряд негативных последствий для окружающей среды и экономики, как прямых (деградация плодородных свойств почвы, снижение сельскохозяйственной продуктивности), так и косвенных (заиление водоемов, отмирание малых рек, перенос и накопление загрязнителей). С этими фактами связана безусловная актуальность прикладных исследований эрозии почв, ставящих своими основными задачами ее прогноз, профилактику и разработку противоэрозионных мероприятий. Во всех случаях, общим требованием к исследованиям процессов перераспределения почвы на сельскохозяйственных землях является

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 04-05-64215, 04-05-64660) и программы поддержки ведущих научных школ России (проект НШ – 1443.2003.5).

возможность получения обоснованных количественных оценок их средних темпов, а также пространственной и временной вариабельности.

К настоящему времени разработан целый ряд методов изучения опасности проявления, темпов и последствий эрозионно-аккумулятивных процессов на пахотных склонах [1–5]. Наиболее распространенными из них являются методы замеров водороев [1, 6–7] и почвенно-морфологический [8–10]. В последние годы все более широко применяется метод радиоактивной метки с использованием изотопа цезия-137 (^{137}Cs) [11–15]. С конца 1960-х годов в США успешно разрабатывается эмпирическая модель для расчета темпов плоскостного и мелкоструйчатого смыва почвы, основанная на использовании данных, полученных при экспериментах на стандартных стоковых площадках – Универсальное уравнение эрозии почв (Universal Soil Loss Equation, USLE) и его модификации [16, 17]. Работы сотрудников НИЛ эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ под руководством Г.А. Ларионова позволили адаптировать эту модель для использования в условиях России [3].

Каждый из перечисленных методов имеет как преимущества, так и существенные ограничения. Временной диапазон получаемых оценок темпов перемещения материала варьирует от одного снеготаяния или ливня (замеры водороев) до всего периода сельскохозяйственного освоения (почвенно-морфологический метод). Поскольку перераспределение почвы на обрабатываемых склонах происходит вследствие совместного действия нескольких процессов – плоскостного и мелкоструйчатого смыва, линейной эрозии, дефляции, механического перемещения почвы пахотными орудиями – важно четко представлять возможности перечисленных выше методов выявить вклад каждого из этих процессов. Кроме того, все методы характеризуются разной точностью и возможностью пространственной экстраполяции полученных результатов [18].

Традиционно подавляющее большинство исследований эрозии почв на сельскохозяйственных землях проводится с использованием одного–двух методов. Использование разными группами исследователей различных подходов при практическом отсутствии оценок их сопоставимости существенно осложняет сравнение и обобщение получаемых результатов. Сравнительная оценка методов количественного определения интенсивности различных эрозионно-аккумулятивных процессов в отношении точности и диапазона возможного использования требует их совместного применения в одном исследовании [19]. Использование комплекса методов позволяет, наряду с определением средних значений, более обоснованно оценивать пространственную и временную неоднородность перераспределения материала. К сожалению, примеры таких работ относительно редки [20–25].

Основной задачей данной работы является исследование темпов и пространственно-временной неоднородности процессов перераспределения почвы на пахотном склоне комплексом независимых методов. Работа проводилась в рамках более масштабного исследования эрозионно-аккумулятивных процессов на распаханных междуречных склонах северной части Среднерусской возвышенности. Нами использовались четыре перечисленных выше метода: непосредственное измерение объемов эрозии и аккумуляции (НИО), радиоцезиевый метод (РМ), почвенно-морфологический метод (ПММ), эмпирико-математические расчетные модели (ЭММ).

Общая характеристика объекта исследований

Район исследований расположен на севере лесостепной зоны (центральная часть Среднерусской возвышенности) в бассейне реки Зуши (рис. 1, А) в пределах опытно-полевого хозяйства (ОПХ) Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции (ЗАГЛОС) имени А.С. Козменко. Хозяйство занимает склоны и куполовидные островные водоразделы юго-восточных отрогов так называемого Плавского плато [26]. Максимальные абсолютные отметки в пределах ОПХ достигают 250–255 м, превышение над местными базисами эрозии составляет 100–110 м, широко развита овражно-балочная сеть (густота расчленения – 1.5 км/км²).

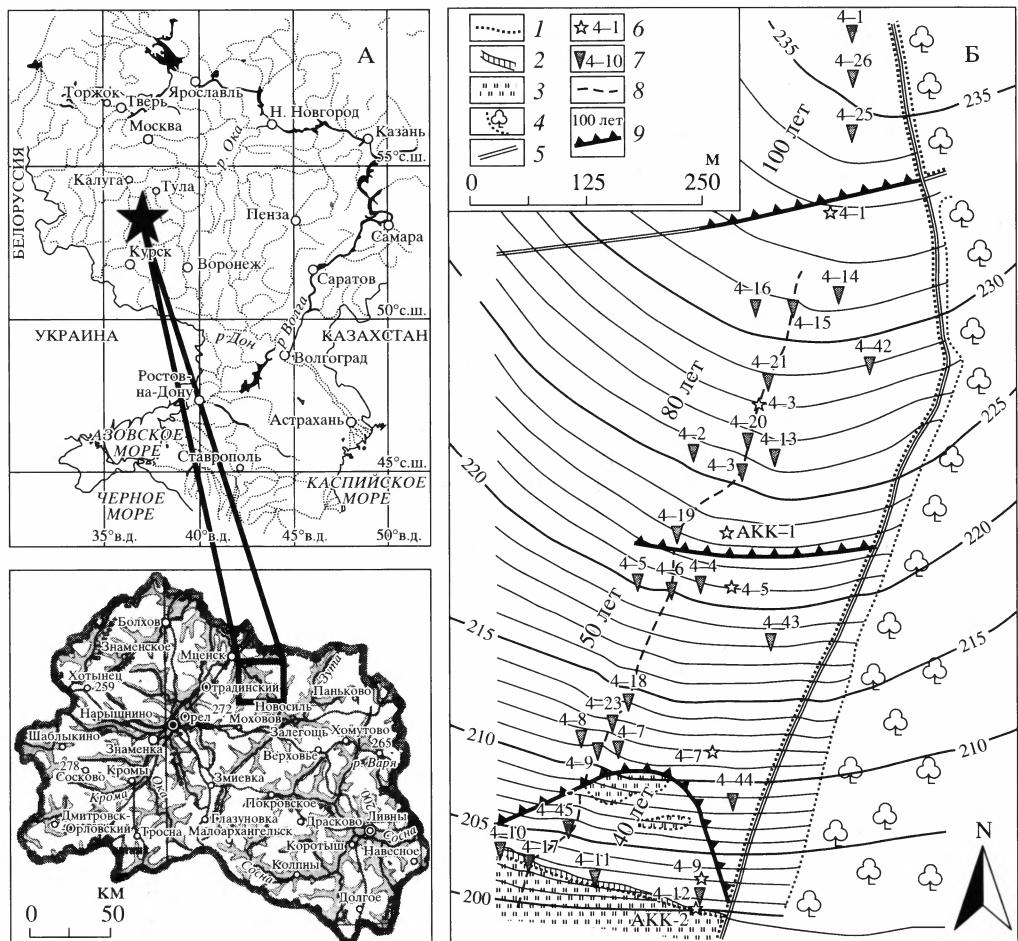


Рис. 1. Местоположение (А) и общая схема (Б) объекта исследований

1 – граница пашни, 2 – напашь, 3 – луг, 4 – граница и территория Бугровского сада, 5 – полевые дороги, 6 – участки отбора образцов на содержание ^{137}Cs , 7 – почвенные разрезы, 8 – тальвег основной ложбины по тахеометрической съемке 2004 г., 9 – приблизительные границы участков склона с различной продолжительностью землепользования

Территория характеризуется умеренно континентальным климатом с устойчивой холодной зимой и теплым летом. Среднегодовое количество осадков составляет около 500 мм, в теплый период выпадает 72% осадков (максимум – в июле). В среднем за год в период с мая по сентябрь бывает 10–13 дней со стокообразующими осадками (более 10 мм) и 3 дня с ливнями (20–40 мм). Наиболее интенсивные ливни (более 40 мм) наблюдаются раз в 3–4 года, большая часть их выпадает в июне – июле. Устойчивый снежный покров устанавливается в среднем в первую неделю декабря, сходит снег обычно к 1 апреля. По данным наблюдений на территории ОПХ, средняя мощность снежного покрова здесь равна 29 см, средняя глубина промерзания грунта – 82 см [27]. Коэффициент стока талых вод для серых лесных почв центральной лесостепи в среднем составляет 0.70–0.93. Максимальный модуль весеннего стока равен примерно 11 л/га/с (для экспериментального водосбора площадью 50 га), средний – 5 л/га/с. Максимальный модуль ливневого стока в 7–8 раз больше [28].

Объект исследований представляет собой междуречный склон южной экспозиции, по основным морфологическим параметрам являющийся характерным для данной территории [28]. Общая длина его от водораздела до бровки долины р. Зуши составляет около 1200 м, длина исследованного участка – 800–850 м (рис. 1, Б), крутизна изменяется от 1–1,5° в верхней части склона до 3–4° – в нижней. Поверхность склона практически полностью распахана, за исключением наиболее крутой нижней приборочной части. Почвенный покров представлен серыми лесными почвами различной степени смытости на лёссовидных суглинках. Поверхность склона осложнена нечетко выраженными в рельефе ложбинами – постоянными формами линейной эрозии [29].

Как показал анализ имеющихся картографических материалов разных лет, по продолжительности землепользования исследованный склон весьма неоднороден (рис. 1, Б). С большой степенью достоверности можно предположить, что верхняя приводораздельная часть (выше дороги, за пределами участка детального исследования) используется в качестве пашни около 100 лет (на карте проявлений линейных размывов и склонового смыва, составленной под руководством А.С. Козменко в 1912 г., ниже этой дороги показано с. Глубки), средняя – 80 и 50 лет (периоды определены по расположению д. Бугровка на топографических картах 1930-х и 1950-х гг.), самая нижняя – 40 лет (по верхней границе садов д. Бугровка на топографической карте 1958 г.). В пределах нижней части склона внутри пашни сохраняются два нераспахиваемых участка, соответствующих, вероятно, остаткам фундаментов разрушенных церквей с. Глубки (рис. 1, Б).

Методы исследований и содержание проведенных работ

Метод непосредственного измерения объемов эрозии и аккумуляции (НИО) заключается в измерении морфометрических параметров эрозионных врезов и аккумулятивных тел для вычисления объема водной эрозии и аккумуляции за одно эрозионное событие. Поперек склона (перпендикулярно линиям тока) закладывается серия микронивелировочных профилей на равном расстоянии друг от друга [1, 6–7]. Вдоль профилей замеряется ширина и глубина струйчатых размывов, а также размеры и мощности аккумулятивных тел. Одновременно зарисовывается расположение эрозионной сети и аккумулятивных тел на склоне. Темпы смыва и аккумуляции материала вычисляются исходя из измеренных средних объемов эрозионных и аккумулятивных микроформ рельефа, а также площади исследуемого участка склона и средней плотности пахотного горизонта. Проверки точности метода на основании сравнения с измерениями мутности воды в замыкающих створах склоновых водотоков показывают, что ошибка обычно не превышает 20–25% в сторону занижения [7] и определяется, главным образом, невозможностью замерить каждую борозду, учесть смыв, проходящий без образования четко выраженных линейных форм, и переотложение материала в виде тонких слойков.

В пределах исследуемого склона нами было заложено 8 микронивелировочных профилей приблизительно в 100 м друг от друга (рис. 2, А). Кроме этого, измерения также были проведены вдоль нижней границы пашни, где наблюдается наибольшая густота микроручейковой сети и имеются относительно крупные аккумулятивные конуса (рис. 2, А). Дополнительно измерялись параметры всех визуально выявляемых участков переотложения наносов на склоне. Исследованный участок склона соответствует четырем микроводосборам с системами микроручейковой сети (рис. 2, А; табл. 1), его общая площадь составляет 15,4 га.

Радиоцезиевый метод (РМ) подразумевает использование содержащегося в почве радиоактивного изотопа цезия-137 (^{137}Cs , период полураспада 30,2 года) в качестве индикатора смыва и аккумуляции, а также для микростратиграфии аккумулятивных толщ. Изотоп ^{137}Cs является искусственным и выпадает на поверхность преимущественно с атмосферными осадками. Попадая на поверхность, ^{137}Cs быстро и химически устойчиво сорбируется глинистыми минералами тонких фракций почвенных ча-

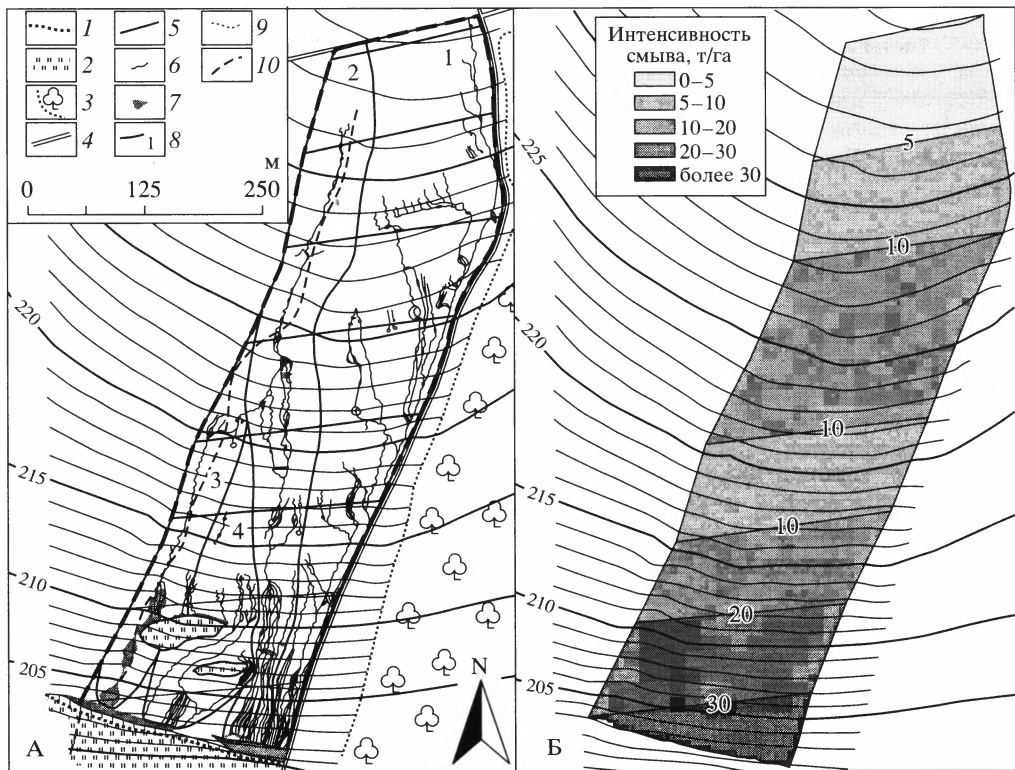


Рис. 2. Эрозионная сеть и участки аккумуляции на исследуемом склоне после ливня в августе 2003 г. (А), а также пояса различной результирующей величины смыва, полученные на основании непосредственных измерений объемов эрозии и аккумуляции по нивелировочным профилям (Б)
 1–4 – см. рис. 1, 5 – микронивелировочные профили, 6 – эрозионные борозды, 7 – аккумулятивные тела, 8 – границы и номера склоновых микроводосборов (табл. 1), 9 – тальveg основной ложбины по тахеометрической съемке 2004 г., 10 – граница исследуемого участка склона

стиц и, в дальнейшем, перемещается только вместе с ними. Это свойство изотопа позволяет использовать его в качестве индикатора процессов перераспределения почвы и наносов. Сравнивая удельный запас изотопа в исследуемой точке с фоновым запасом на геоморфологически стабильном участке, характеризующем первоначальный уровень выпадения ^{137}Cs из атмосферы (так называемым эталонным значением), можно оценить интенсивность перераспределения почвы и направленность процесса. Метод дает интегральную оценку перемещения материала, суммируя вклад таких процессов, как плоскостной и мелкоструйчатый смыв, ветровая эрозия, механическое перемещение почвы сельскохозяйственными орудиями [11, 14, 24]. Для перехода от относительных величин изменения запаса изотопа в опробованных точках к количественным оценкам средних темпов перераспределения почвы разработан целый ряд калибровочных зависимостей, в разной степени учитывающих особенности выпадения и последующего перемещения ^{137}Cs [13, 30–31]. Особенности применения метода, его преимущества и ограничения, методика полевых и лабораторных работ детально рассмотрены в ряде публикаций [11, 14–15, 31–33].

Отбор образцов на радиоцезиевый анализ производился в августе 2003 года, непосредственно после того, как на склоне сформировалась сеть эрозионных борозд. Точки отбора располагались перпендикулярно тальвегу основной эрозионной борозды, приблизительно вдоль каждого нечетного микронивелировочного профиля (рис. 1, Б).

Расчет внутрисклоновых различий темпов эрозии и аккумуляции по микроводосборам основных систем эрозионных борозд, измеренных после ливня в августе 2003 г.

№ микроводосбора (рис. 2, А)	Расположение	Площадь микроводосбора, га	Сумма длин борозд, м	Объем борозд, м ³	Масса перемещенного материала, т	Интенсивность смыва по бороздам, т/га	Внутрисклоновая аккумуляция (без шлейфов), т	Интенсивность внутрисклоновой аккумуляции, т/га	Интенсивность выноса за пределы пашни, т/га
1	У дороги	7.4	4822	105.0	103.5	14.1	1.4	0.2	13.9
2	Центральный	4.2	2745	57.8	57	13.6	0.8	0.2	13.4
3	Дальний от дороги	1.5	976	23.2	23	15.9	1.1	0.8	15.1
4	Другие борозды	1.7	1276	34.5	34	20.3	0.5	0.3	20.0

На каждом опробованном профиле отбиралась группа из трех интегральных образцов: один из днища основной эрозионной борозды (за исключением самого верхнего профиля), а оставшиеся два – с визуально незатронутых рассматриваемым эрозионным событием участков (с микрогребней и из понижений между ними, оставшихся после боронования поля). Отбор производился стальным цилиндрическим пробоотборником диаметром 8,2 см в один укол до глубины, превышающей мощность пахотного горизонта (30 см). В точке, расположенной в пределах аккумулятивного шлейфа непосредственно выше напаши (АКК-2 – рис. 1, Б) дополнительно тем же пробоотборником отбирались слои 30–50 и 50–60 см, чтобы выявить возможное погребение части аккумулятивного горизонта наносами. Кроме этого, из двух аккумулятивных тел (АКК-1 – в середине склона и АКК-2 – на шлейфе, рис. 1, Б) отбирались отдельно только свежие наносы (с квадрата площадью 20 × 20 и 15 × 15 см соответственно), с целью определения возможных отличий концентрации ¹³⁷Cs от наблюдаемой в пахотном горизонте, что свидетельствовало бы о гранулометрической избирательности эрозии и транспорте частиц различной крупности. Послойные образцы отбирались из разреза 4–1, выбранного в качестве эталонного и расположенного на плоском водораздельном участке непосредственно выше исследуемого склона (рис. 1, Б), до глубины 50 см через каждые 5 см (с квадрата площадью 20 × 20 см). Измерения активности изотопа проводились в Институте глобального климата и геологии РАН.

Необходимо отметить, что использованная в данном случае методика отбора интегральных образцов на пашне существенно отличается от применявшейся нами ранее в ряде подобных исследований [15, 22–24, 33], когда в одном образце смешивался материал, отобранный в два укола пробоотборника (один в понижении, другой в повышении микрорельефа пашни), с целью получения осредненного значения и исключения влияния локальной микровариабельности запасов ¹³⁷Cs [14]. В настоящем исследовании мы пытались оценить с помощью радиоцезиевого метода не только средние темпы перераспределения почвы за весь период присутствия изотопа в окружающей среде, но и влияние конкретного эрозионного события. Поэтому важно было определить, существуют ли значимые различия запаса ¹³⁷Cs между различными элементами микрорельефа исследованного участка склона, которые позволили бы вычленить вклад смыва почвы после недавнего ливня в суммарные объемы перераспределения изотопа и, соответственно, почвы.

Почвенно-морфологический метод (ПММ) (или метод почвенно-геоморфологических профилей) основан на фиксации изменений мощности верхних генетических горизонтов почвы конкретного склона с помощью традиционных описаний разрезов, расположенных вдоль линий тока [5, 9, 34]. Метод позволяет качественно и количественно охарактеризовать суммарное воздействие всех процессов перемещения материала на почвенный профиль за период агрикультурного освоения территории по-

средством сравнения его строения в каждой точке в пределах исследуемого участка склона с выбранным эталоном, расположенным на геоморфологически стабильном участке. Величина смытого или намытого слоя определяется по разности между мощностью верхних почвенных горизонтов эталона и разрезов на склоне [5–6, 9, 35]. Обычно для этого выбираются те несколько горизонтов, суммарная мощность которых является наименее вариабельной для данного типа почвы [10, 36]. Поскольку для серых лесных почв разными авторами предлагаются различные подходы к выбору эталона, в данной работе использовались два варианта расчета – по сумме горизонтов $A_{\text{пах}} + AE$ и $A_{\text{пах}} + AE + EB$. Зная среднюю плотность материала верхней части почвенного профиля и продолжительность земледельческого освоения исследуемого склона, можно перейти к среднегодовым темпам перемещения рыхлого материала.

Заложение и описание почвенных разрезов и скважин проводилось в августе 2004 г. после уборки озимых и грубой зяблевой вспашки. При выборе положения почвенных разрезов учитывался микрорельеф склона. Разрезы расположены с таким расчетом, чтобы охарактеризовать, в первую очередь, микроводосбор основной ложбины, проходящей через весь исследуемый участок склона. Они закладывались как в тальвеге ложбины, так и на рядом расположенных микроводоразделах (рис. 1, Б). Такое расположение разрезов позволило провести расчеты темпов эрозии и аккумуляции не только в среднем для всего исследуемого участка склона, но и дифференцированно для его основных геоморфологических элементов. Всего было описано 15 разрезов (из них 2 в дальнейшем рассмотрении не учитываются из-за антропогенной нарушенности субстрата) и 11 скважин.

Эмпирико-математические эрозионные модели (ЭММ) основываются на опытных данных, полученных, в основном, в результате экспериментальных наблюдений на стоковых площадках. Большая их часть не имеет строгого физического обоснования, но достаточно проста в применении и позволяет получить довольно близкие к реальности величины поверхностной эрозии. В основании использованного нами подхода лежат две модели (USLE для ливневого стока и ГГИ для снеготаяния), модифицированные и совмещенные в программном пакете, разработанном сотрудниками НИЛ эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ под руководством Г.А. Ларионова [3, 37].

Первая из моделей основана на универсальном уравнении эрозии почв (USLE), разработанном в США, и позволяет рассчитывать среднесезонные темпы дождевого смыва [16, 17]. Вторая, разработанная в Государственном гидрологическом институте (ГГИ, Санкт-Петербург), дает возможность рассчитывать величины эрозии почв от талого стока [3, 37, 38]. Зависимости, лежащие в основе моделей, получены опытным путем и неоднократно проверены экспериментально. Смыв рассчитывается вдоль линий тока, которые разбиваются на отрезки равной длины. Модели позволяют рассчитывать потенциальный средний смыв с поля для различных условий, а также оценивать внутрисклоновое распределение ареалов эрозии и аккумуляции на основании данных об изменениях интенсивности смыва вдоль линий тока. Прямое вычисление внутрисклоновой аккумуляции в использованной нами версии программного обеспечения невозможно.

Входными данными для расчетной программы являются эмпирические коэффициенты факторов эрозии. Региональные диапазоны значений большинства из них (эрозионный потенциал осадков, эрозионные индексы сельскохозяйственных культур) для большей части сельскохозяйственно освоенной территории России имеются во входящей в состав программного пакета базе данных. Фактор рельефа определяется согласно морфометрическим характеристикам конкретного объекта. Характеристики почвы частично получены нами при лабораторных анализах образцов, частично заимствованы из работы Г.П. Сурмача [8].

Расчеты производились для двух вариантов линий тока: 1) построенных по топографической карте м-ба 1:25000 (наиболее крупного из имеющихся в наличии); 2) фактически наблюдавшихся (проведенных в соответствии с микрорельефом склона и ориен-

тацией основных эрозионных борозд после ливня в августе 2003 г.). Использовались два варианта севооборотов: 1) фактически применявшийся с 1986 г. (пар – 13.5%, пашенные культуры – 7%, яровые – 27%, озимые – 23%, однолетние травы – 16%, зернобобовые – 13.5%); 2) один из наиболее характерных для исследуемой территории (34% – многолетние травы, 10% – пар, по 14% – озимые, яровые, однолетние травы, пропашные культуры).

Полученные оценки темпов перераспределения почвы на склоне

Метод непосредственного измерения объемов эрозии и аккумуляции. Проведенные нами работы позволили составить подробную схему сети эрозионных борозд и морфологически выраженных участков переотложения рыхлого материала на исследуемом склоне (рис. 2, А). В числе основных факторов, определявших пространственную ориентацию борозд, можно назвать направление линий тока, микрорельеф (например, крупная борозда в центральной части склона, заложившаяся по ложбине), антропогенное вмешательство (направление боронования, приуроченность борозд к дороге, дорожки – следы прогона скота). Внутрисклоновое переотложение выразилось в накоплении материала в небольших аккумулятивных телах в центральной и нижней части склона, перед нераспаханными участками, а также в аккумулятивных шлейфах у подножия склона (рис. 2, А).

Проведенные по описанной выше методике расчеты показывают, что осредненный по площади исследованного участка пашни смыв за один ливень составил 13.5 т/га, внутрисклоновая аккумуляция – 0.9 т/га, а вынос рыхлого материала за пределы пашни 12.6 т/га. Таким образом, в ходе рассматриваемого эрозионного события большая часть смытого материала (более 93%), “переваливая” через напашь, выносилась за пределы поля. Суммарная площадь зон внутрисклонового переотложения наносов составила чуть более 2% от общей площади исследуемого участка склона, а объем аккумулярованного в них материала – около 6.5% от объема эрозионных борозд.

Результаты измерений позволили также рассчитать изменения интенсивности смыва вниз по склону для зон, расположенных между линиями профилей (рис. 2, Б). Величины смыва за один ливень изменяются вдоль склона от менее 2 т/га в верхней его части до более 50 т/га в нижней. Начиная примерно с середины склона, выделяется зона с пониженными значениями интенсивности смыва. Это, вероятно, связано с достижением склоновыми потоками предельной насыщенности наносами, временным прекращением их врезания и переотложением части наносов. Образующиеся при этом аккумулятивные микроконусы вызывают блуждание потоков. Обращает на себя внимание, что начало этой зоны близко к участку склона, где основная система эрозионных борозд после ливня в августе 2003 г. не совпала с положением тальвега основной ложбины по съемке 2004 г. (рис. 2). Во время ливня в тальвеге ложбины на этом участке происходило довольно интенсивное переотложение наносов, поступавших с вышележащей части склона. Кроме этого, направление боронования, проведенного незадолго до ливня, было практически перпендикулярно к тальвегу ложбины. В результате сток с верхней части микроводосбора пошел вдоль направления боронования по периферии образовавшегося аккумулятивного тела в соседний микроводосбор, и лишь небольшая часть его несколько ниже по склону возвращалась в основную ложбину (рис. 2, А). Ниже крутизна склона возрастает, и осветленный склоновый сток опять начинает эрозионную работу: существенно увеличивается густота эрозионных борозд, вновь растет рассчитанная интенсивность смыва почвы (рис. 2). Это происходит даже несмотря на имеющиеся на склоне локальные препятствия стоку воды в виде нераспахиваемых участков, расположенных предположительно на месте фундаментов бывших церквей, непосредственно вдоль которых склоновые потоки также аккумулируют часть наносов, обтекая их (рис. 2).

Кроме представленных расчетов суммарного смыва с поля за рассматриваемое эрозионное событие, произведена оценка внутрисклоновой дифференциации темпов эро-

зии и аккумуляции по микроводосборам основных систем эрозионных борозд (рис. 2, А; табл. 1). Из полученных результатов видно, что, наряду с продольной склоны, наблюдается также значительная дифференциация темпов смыва вдоль его простира- ния. Это связано с влиянием локальных факторов – особенностей микрорельефа и, вероятно, направления обработки. Величина выноса материала поверхностными вод- ными потоками за пределы микроводосборов больше, чем за пределы склона и со- ставляет в среднем 15.6 т/га. Это связано с тем, что большая часть внутрисклоновой аккумуляции (около 75%) осуществляется в виде накопления делювиальных шлей- фов, расположенных вдоль напаша уже за пределами микроводосборов эрозионных борозд.

Радиоцезиевый метод. Район исследований расположен в зоне сильного чернобыльско- го загрязнения. Запасы “бомбового” цезия составляют порядка 2.5–3.0 кБк/м², тогда как величина чернобыльского загрязнения превышает 30 кБк/м² [40]. Поскольку более 90% из общих запасов ¹³⁷Cs на данной территории приходится на чернобыльское вы- падение, было принято решение пренебречь долей “бомбового” цезия, величина кото- рой находится в пределах ошибки метода ($\pm 10\%$). Соответственно, не учитывается и вероятное перераспределение изотопа эрозионно-аккумулятивными процессами до 1986 г. Исходя из этого, период времени от начала выпадения до момента опробова- ния, учитываемый в расчетах по калибровочным зависимостям, принят равным 17 го- дам (1986–2003 гг.).

На основании изучения нескольких геоморфологически стабильных участков в окрестностях исследованного склона, за опорное значение для расчетов темпов эрози- онно-аккумулятивных процессов была принята величина запаса ¹³⁷Cs (37 944 Бк/м²) в разрезе 4–1 (рис. 1, Б). При этом предполагается, что опорный разрез характеризует выпадение радионуклида в пределах исследуемого участка склона. Анализ метеорологических данных показал, что в период с 26.04 (авария на Чернобыльской АЭС) по 05.06.1986 на данной территории не наблюдалось стокообразующих (более 10 мм) осадков. Поскольку известно, что большая часть ¹³⁷Cs чернобыльского проис- хождения выпала в течение первого месяца после аварии, это свидетельствует об от- сутствии влияния поверхностного стока на первоначальное распределение запаса изо- топа.

Сравнение измеренных величин концентрации изотопа в свежих наносах (59.5 и 71.3 Бк/кг) с диапазоном значений, полученных для интегральных образцов из пахот- ного горизонта (48.1–91.5 Бк/кг), показывает отсутствие значимых отличий. Это сви- детельствует о несущественном проявлении гранулометрической избирательности эрозии (т. е. преимущественного выноса частиц более тонких фракций), по крайней мере, во время наблюдавшегося нами ливня. Такой вывод представляется закономер- ным, учитывая тот факт, что большая часть массы аккумулярованных наносов пред- ставляла собой так называемые гумусированные “окатыши” диаметром около 1 мм – окатанные водным потоком почвенные агрегаты, состоящие из частиц различной раз- мерности. Хорошая сортировка материала наблюдается только в маломощных (пер- вые миллиметры, реже – 1–2 см) прослойках светло-серого тонкослоистого алевроита, которые отлагаются на участках существенного снижения скоростей потоков и име- ют подчиненное значение в строении аккумулятивных тел. Таким образом, при пере- ходе от величин запаса ¹³⁷Cs к количественным показателям темпов эрозионно-акку- мулятивных процессов нет необходимости учитывать их гранулометрическую избира- тельность.

При анализе рис. 3, на котором приведен график изменения запаса изотопа вдоль основной эрозионной борозды по различным элементам микрорельефа склона, в первую очередь обращают на себя внимание очень низкие значения запасов ¹³⁷Cs на верхнем профиле. Точки отбора проб здесь располагались достаточно близко к грун- товой дороге, положение которой, как свидетельствует топографическая карта 1958 года, отличалось от современного. В пределах пахотных угодий колеи грунтовых дорог да- же в течение одного года могут неоднократно менять свое положение, “мигрируя” в

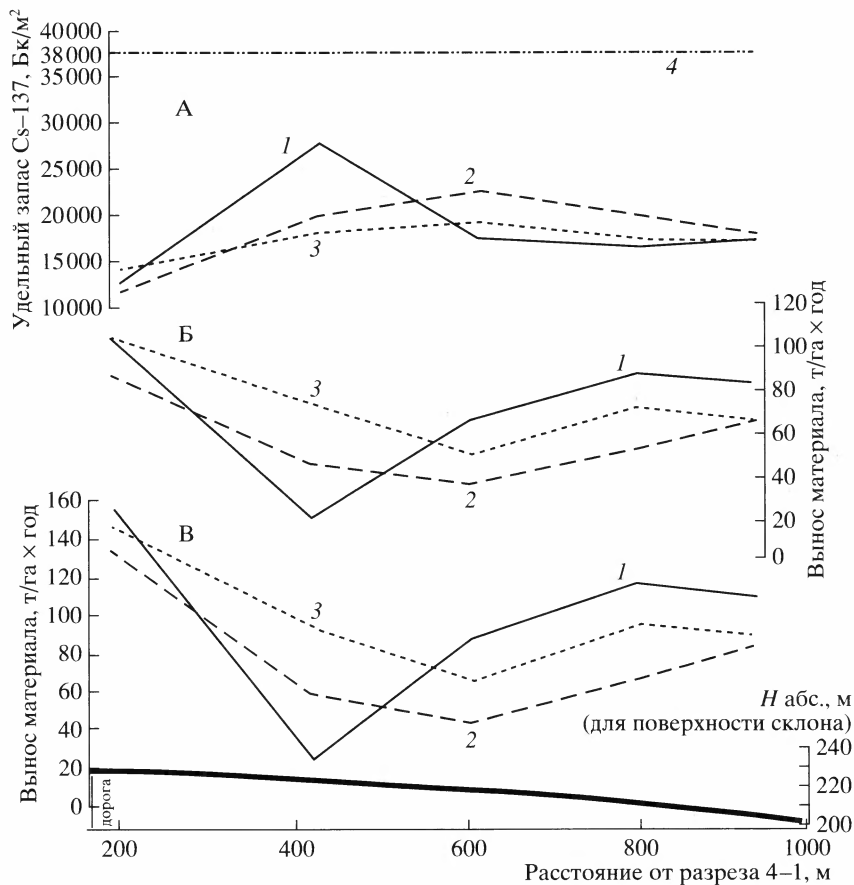


Рис. 3. Изменения вдоль склона запасов ^{137}Cs (А) и вычисленных по пропорциональной (Б) и простой масс-балансовой (В) калибровочным моделям среднегодовых темпов денудации с 1986 г.

Образцы: 1 – из тальвега основной эрозионной борозды, 2 – из микропонижений, 3 – из микрогребней; 4 – запас изотопа в эталонном разрезе

некотором коридоре. По всей видимости, точки отбора совпали с таким коридором, который впоследствии был выровнен в результате перепаживания. Низкие запасы изотопа здесь связаны преимущественно с механической денудацией, а также выносом грунта вдоль колеи дороги за пределы исследуемого участка склона (рис. 1, А). Поэтому данные верхнего профиля не использовались в дальнейшем при расчетах средних темпов перераспределения почвы.

В нижней половине склона (начиная с нивелировочного профиля 5), как и ожидалось, в тальвеге эрозионной борозды наблюдаются более низкие значения запаса ^{137}Cs , чем на микроводоразделах. Это, видимо, отражает смыв почвы по борозде за один ливень (рис. 3, А). Однако на нивелировочном профиле 3 запас ^{137}Cs в борозде превышает запас на визуально незатронутых смывом участках (рис. 3, А). Такая аномалия связана со значительной удельной активностью ^{137}Cs в отобранном образце. Это может быть обусловлено более тонким механическим составом пахотного горизонта (^{137}Cs преимущественно сорбируется частицами глинистой и алевритистой фракций), или увеличенной мощностью почвенного слоя, содержащего изотоп, т. е. присутствием погребенного в результате аккумуляции пахотного горизонта. На наш взгляд, более обоснованным представляется второе объяснение. Вероятнее всего,

Расчет среднегодовых темпов перераспределения почвы (т/га × год) радиоцезиевым методом

Нивелировочный профиль	Расстояние от разреза 4–1, м	Пропорциональная модель			Простая балансовая модель		
		микрорребни	микрорпонижения	эрозионная борозда	микрорребни	микрорпонижения	эрозионная борозда
1	195	87.2	103.0	105.8	133.6*	146.8	157.3
3	425	46.0	73.9	22.7	56.9	95.0	24.1
5	610	37.9	52.1	67.2	44.3	65.6	87.9
7	800	53.2	71.3	87.4	65.9	93.8	117.2
9	935	65.0	67.4	83.2	84.5	89.0	109.7
Среднее		50.5	66.2	65.1	62.9	85.9	84.7

* Результаты, расположенные в затемненных ячейках, в расчете среднего значения и в дальнейших расчетах не учитываются (объяснение в тексте).

точка пробоотбора в эрозионной борозде на нивелировочном профиле 3 расположена в зоне, характеризующейся чередованием эрозии (развитие эрозионных борозд в днище ложбины) и аккумуляции (заполнение борозд материалом пахотного горизонта с прилегающих микроводоразделов в результате смыва или механического сноса пахотными орудиями). В наиболее глубоких из ранее погребенных борозд мог сохраниться материал пахотного горизонта, концентрация ^{137}Cs в котором соответствует более высоким значениям, наблюдавшимся вскоре после чернобыльской аварии.

Запас ^{137}Cs на микрорребнях по всей длине склона превышает запас в микропонижениях (рис. 3, А), где во время ливня, очевидно, также происходил смыв почвы. В верхней части склона последствия этого процесса были выражены относительно слабо, но по мере продвижения к подножию склона его интенсивность увеличивалась. Об этом свидетельствуют как полевые наблюдения, так и результаты радиоизотопного анализа – запасы изотопа в микропонижениях в этом же направлении приближаются к запасам в днище основной эрозионной борозды, отражая увеличение интенсивности смыва.

Для перехода от относительных величин запаса ^{137}Cs в точках опробования к средним темпам перераспределения почвы нами были использованы наиболее широко применяемые и относительно простые в отношении ввода данных калибровочные зависимости – пропорциональная и простая масс-балансовая модели. Особенности, преимущества и ограничения обеих моделей достаточно подробно описаны в литературе [13, 15 и др.]. Из результатов расчетов, приведенных в таблице 2, видно, что скорости денудации поверхности, рассчитанные по простой масс-балансовой модели, во всех точках превышают полученные по пропорциональной модели. Это закономерно, и связано с тем, что первая учитывает уменьшение во времени концентрации изотопа в пахотном горизонте эродируемой точки за счет подпашки не содержащего ^{137}Cs материала из нижележащего горизонта, тогда как в пропорциональной модели принимается допущение о постоянстве во времени концентрации ^{137}Cs в пахотном горизонте [13].

Вниз по склону вдоль основной эрозионной борозды наблюдается чередование зон с разной интенсивностью денудации (табл. 2). В то же время, на всех нивелировочных профилях, кроме профиля 3, максимальные темпы характеризуют борозды, средние – микропонижения между гребнями боронования, самые низкие – гребни. Предположим, что разница между измеренными запасами изотопа в точках на микрорребнях с одной стороны и в тальвеге эрозионной борозды и микропонижениях с другой стороны прямо пропорциональна выносу материала из последних за один рассматриваемый ливень. Тогда величина смыва за ливень для системы основной эрозионной борозды (микроводосбор 2 на рис. 2, А) может быть оценена как 10.2 т/га (вынос материала из

эрозионных борозд) плюс 8,6 т/га (вынос материала из микропонижений боронования), т. е. 18,8 т/га в пересчете на всю площадь рассмотренного микроводосбора (4,2 га). Конечно, приведенные величины имеют весьма приблизительный характер и точность их оценить невозможно, поскольку они получены всего по 5 измерениям. Однако очевидно потенциальная возможность применения ^{137}Cs для количественной оценки перераспределения почвы за одно эрозионное событие, что позволит расширить диапазон применения метода.

В целом, анализ распределения запасов изотопа в изученных образцах и результатов расчетов средних темпов эрозионно-аккумулятивных процессов за последние 17 лет по калибровочным моделям показывает очень значительные потери ^{137}Cs и, следовательно, почвы за относительно непродолжительное время. Это может быть объяснено либо действительно имевшим место усилением интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов в этот период, либо погрешностями определения запаса ^{137}Cs и темпов перераспределения почвы в исследованных точках, связанными с условиями отбора проб и использованием нестандартной методики. В частности, отбор проб непосредственно после боронования при неуплотненной верхней части пахотного горизонта мог привести к занижению запаса ^{137}Cs из-за временного увеличения мощности содержащего изотоп слоя почвы до превышающей 30 см, в особенности на микрогребнях. Кроме того, при отборе проб в один укол не исключено влияние локальной микровариабельности запаса изотопа в пахотном горизонте, которая, в первую очередь, зависит от степени увлажненности верхней части почвенного профиля во время проведения механической обработки.

Другим возможным источником ошибки является использование одной величины эталонного запаса ^{137}Cs при расчетах для всего склона. Поскольку чернобыльские выпадения характеризовались значительной пространственной неравномерностью [14, 15, 39], нельзя исключать возможность существования значительного пространственного тренда первоначального выпадения изотопа. Величина первоначального запаса чернобыльского цезия должна возрастать на северо-запад, в сторону так называемого «Плавского цезиевого пятна». В этом случае для расчета темпов эрозионно-аккумулятивных процессов в нижней части исследуемого склона следовало бы брать более низкую величину эталонного запаса, чем полученную для разреза 4–1. При таком подходе рассчитанные по калибровочным моделям темпы смыва на большей части склона оказались бы более низкими.

Нельзя исключить также возможность существенного влияния на характер первоначального распределения запаса ^{137}Cs в почве одного или нескольких значительных эрозионных событий, которые могли иметь место в период между чернобыльской аварией и первым перепахиванием поля летом-осенью 1986 г. Если это действительно происходило, существенная часть запаса изотопа могла быть смыта вместе с тонким поверхностным слоем почвы еще до перемешивания пахотного горизонта. В таком случае калибровочные зависимости, предполагающие равномерное распределение концентрации ^{137}Cs в пахотном горизонте, дают завышенные величины средних темпов перераспределения почвы. Согласно имеющимся в нашем распоряжении метеоданным, достаточно интенсивные ливневые осадки наблюдались по всей северной части Орловской области в последней декаде августа 1986 г., наиболее сильный ливень прошел 26.08.1986, когда выпало 25–35 мм осадков (метеостанции Мценск и Орел). В случае, если исследуемое поле на тот момент было уже убрано, но еще не перепахано, смыв почвы, и, соответственно, потери запаса ^{137}Cs могли быть весьма значительными.

По нашему мнению, среднегодовые темпы деградации почвы, рассчитанные по результатам анализа проб, отобранных по нестандартной методике, являются завышенными. Сравнение данных таблицы 2 с результатами приблизительной оценки смыва за наблюдавшееся нами эрозионное событие (см. выше) показывает, что интенсивный ливень с частотой повторяемости примерно раз в 3–4 года, выпавший на поле под боронованным паром (т. е. при практически идеальных для развития смыва условиях) произвел эрозионную работу, соответствующую лишь примерно 20–40% среднегодо-

вой денудации. Это выглядит маловероятным, особенно учитывая, что в последние годы, в условиях наблюдающегося снижения расходов воды и интенсивности смыва почвы в период снеготаяния, именно интенсивные ливни относительно редкой повторяемости играют основную роль в смыве почвы на исследуемой территории. В то же время, различные запасы изотопа на разных элементах микрорельефа склона, по-видимому, действительно отражают величину потерь почвы за один наблюдавшийся нами ливень. В дальнейшем предполагается сравнить представленные результаты с результатами анализа образцов, отобранных на исследуемом склоне стандартным способом (в два укола) на более благоприятном агрофоне (с уплотненной поверхности пашни непосредственно после уборки озимых, до перепахивания), чтобы попытаться выявить возможные источники ошибки измерений запаса изотопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заславский М.Н.* Эрозиоведение. М.: Высш. шк., 1983. 320 с.
2. *Loughran R.J.* The measurement of soil erosion // *Progress in Physical Geography*. 1989. № 13. P. 216–233.
3. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
4. *Morgan R.P.C.* Soil erosion and conservation. Second edition. Longman Malaysia Publishers, 1995. 198 p.
5. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ Академкнига, 2002. 255 с.
6. *Соболев С.С.* Защита почв от эрозии и повышение их плодородия. М.: Сельхозиздат, 1961. 232 с.
7. *Швебс Г.И.* Теоретические основы эрозиоведения. Киев–Одесса: Вища шк. Головное изд-во, 1981. 222 с.
8. *Сурмач Г.П.* Почвенно-эрозионные исследования на Среднерусской возвышенности // *Сельскохозяйственная эрозия и борьба с ней*. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 70–110.
9. *Ларионов Г.А., Кирюхина З.П., Самодурова Л.С.* Определение темпов смыва методом парных разрезов // *Эрозия почв и русловые процессы*. М.: Изд-во МГУ, 1973. Вып. 3. С. 162–167.
10. *Кирюхина З.П., Серкова Ю.В.* Вариабельность морфометрических показателей подзолистых почв и диагностика эродированности // *Эрозия почв и русловые процессы*. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 12. С. 63–70.
11. *Walling D.E., Quine T.A.* Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data // *Land Degradation and Rehabilitation*. 1990. № 2. P. 161–175.
12. *Higitt D.L.* The development and application of caesium-137 measurements in soil erosion investigations // *Sediment and Water Quality in River Catchments*. 1995. P. 287–304.
13. *Walling D.E., He Q.* Improved models for estimating soil erosion rates from caesium-137 measurements // *Journal of Environmental Quality*. 1999. № 28. P. 611–622.
14. *Голосов В.Н.* Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // *Геоморфология*. 2000. № 2. С. 26–33.
15. *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.
16. *Wishmeier W.H., Smith D.D.* Predicting rainfall erosion losses from cropland east of Rocky Mountains. *Agric. Handbook* № 282. Washington. 1965. 48 p.
17. *Renard K.G., Meyer L.D., Meyer G.R.* Predicting soil erosion by water – a guide to conservation planning with revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA. ARS. Washington. 1994.
18. *Higitt D.L.* Soil erosion and soil problems // *Progress in Physical Geography*. 1991. № 15. P. 91–100.
19. *Boardman J., Dearing J.A., Foster I.D.L.* Soil erosion studies // *Soil erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons Ltd. 1990. P. 659–672.
20. *Montgomery J.A., Busaca A.J., Frazier B.E., McCool D.K.* Evaluating soil movement using cesium-137 and the revised universal soil loss equation // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. № 61. P. 571–579.
21. *Turnage K.M., Lee S.Y., Foss J.E. et al.* Comparison of soil erosion and deposition rates using radiocesium, RUSLE and buried soils in dolines in East Tennessee // *Environmental Geology*. 1997. № 29. P. 1–10.
22. *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.
23. *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.

24. *Belyaev V.R., Golosov V.N., Ivanova N.N.* et al. Human-accelerated soil redistribution within an intensively cultivated dry valley catchment in southern European Russia // *Sediment Budgets I* (Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguacu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. № 291. 2005. P. 11–20.
25. *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. № 65. P. 173–193.
26. *Зыков И.Г., Зайченко К.И.* Почвенно-эрозийная карта землепользования Новосильской ЗАГЛОС им. А.С. Козменко // *Фитомелиорация Нечерноземья*. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1996. Вып. 1 (107). С. 15–25.
27. План организационно-хозяйственного устройства опытного хозяйства Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции им. А.С. Козменко. Орел: 1975. рукопись.
28. *Арманд Д.Л., Лидов В.П., Сетунская Л.Е., Хмелева Н.В.* Физико-географическая характеристика Новосильского и Острогожского ключевых участков // *Сельскохозяйственная эрозия и борьба с ней*. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1956. С. 38–107.
29. *Арманд Д.Л.* Антропогенные эрозийные процессы // *Сельскохозяйственная эрозия и борьба с ней*. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1956. С. 7–46.
30. *Сидорчук А.Ю., Голосов В.Н.* Калибровка моделей почвенной эрозии на основе изучения выпадающих из атмосферы радиоизотопов // *Почвоведение*. 1993. № 7. С. 862–869.
31. *Loughran R.J.* The use of the environmental isotope caesium-137 for soil erosion and sedimentation studies // *Trend in Hydrology*. 1994. № 1. P. 149–167.
32. *Острова И.В., Силантьев А.Н., Литвин Л.Ф. и др.* Оценка интенсивности эрозийно-аккумулятивных процессов по содержанию в почве цезия-137 // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*. 1990. № 5. С. 79–85.
33. *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 caesium-137: A case study of the Lapki catchment, Central Russia // *Geomorphology*. 2001. № 40. P. 185–204.
34. *Соболев С.С.* Развитие эрозийных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. Т. 1. 306 с.
35. *Шурикова В.И.* Диагностика и классификация эродированных почв // *Эродированные почвы и эффективность почвозащитных мероприятий*. М.: ГИЗР, 1987. С. 88–95.
36. *Сурмач Г.П.* Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозийные мероприятия. Волгоград: Нижн.-Волжск. кн. изд-во, 1992. 175 с.
37. *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.
38. *Бобровицкая Н.Н.* Эмпирический метод расчета смыва со склонов // *Сток наносов, его изучение и географическое распределение*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 202–211.
39. Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины / Ю.А. Израэль. М.: Росгидромет, Роскартография, 1998. 142 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
17.03.2006

EVALUATION OF SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF SOIL REDISTRIBUTION WITHIN AN ARABLE SLOPE (PART 1)

Ju.S. KUZNETSOVA, V.R. BELYAEV, M.V. MARKELOV, N.N. IVANOVA

S u m m a r y

Four independent techniques were applied for quantitative evaluation of soil redistribution rates within an arable slope and their spatial-temporal variability over the agricultural period. Such a complex approach allows mutual control and cross-validation of results, increasing their reliability. Sinuous pattern of the soil redistribution rate variation along the slope is associated with the specifics of a runoff formation and rill development in the slope hollow bottoms. Different temporal resolution of the techniques used has allowed making a rough estimation of contribution of individual events into total soil losses.