

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф. Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. 2016. № 5.

Ларионов Г.А., Бушуева О.Г. Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Эродируемость модельной почвы различной плотности // Почвоведение. 2011. № 8.

Ларионов Г.А., Гендугов В.М., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Механизмы боковой эрозии в склоновых ручьях // Почвоведение. 2008. № 3.

Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В., Судницын И.И. Влияние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межаггатных связей // Почвоведение. 2017. №3.

Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связанных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2.

Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971.

Т.С. Кошовский, А.Н. Геннадиев, А.П. Жидкин

МОДЕЛИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РАСЧЁТА ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ МАГНИТНОГО ТРАССЕРА НА ПРИМЕРЕ МАЛОГО ВОДОСБОРА *

Введение

Одним из способов количественной оценки эрозионно-аккумулятивных явлений является метод магнитного трассера (ММТ), позволяющий определять их темпы в среднем за 100-летний период. На данный момент опубликованы результаты работ по использованию метода для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных явлений в пределах почвенных катен [Геннадиев и др., 2002, 2004, 2005; Olson et al, 2003, 2013], целостных малых водосборов [Жидкин, 2010; Геннадиев и др., 2013], для выявления воздействия эрозионно-аккумулятивных процессов на свойства почв [Геннадиев и др., 2010, Olson et al, 2012], проводилось также сравнение с иными методами исследования эрозии почв [Голосов и др., 2011; Olson et al, 2008, 2013; Геннадиев и др., 2005, 2006; Жидкин и др., 2015].

Метод магнитного трассера основан на использовании в качестве маркеров эрозионно-аккумулятивных процессов (ЭАП) сферических магнитных частиц. Сферические магнитные частицы (СМЧ) являются составляющими пепла, образующегося и выбрасываемого в атмосферу при высокотемпературном сжигании материалов с повышенным содержанием железа – преимущественно угля и некоторых других видов твердого топлива. Ос-

* Разработка моделей количественного расчета эрозионно-аккумулятивных процессов проведена в рамках проекта Российского научного фонда – проект 14-27-00083.

новными источниками СМЧ на изучаемой территории служили паровые локомотивы на железных дорогах, теплоэлектростанции и отопительные системы. Начало интенсивного накопления магнитных сферул на территории исследования относится к 1868 г, когда стала функционировать железная дорога Москва – Орёл. Многократные выпадения СМЧ из воздушного бассейна на поверхность почвенного покрова обуславливают равномерное поступление сферул на территорию в пределах локальных местностей. Ежегодная распашка приводит к равномерному распределению СМЧ по вертикальному профилю пахотного горизонта.

Основным способом перераспределения выпавших магнитных сферул в почве служит их перемещение совместно с почвенной массой при эрозионно-аккумулятивных явлениях. Поэтому по современному распределению запасов СМЧ в почвенном покрове можно оценить среднегодовые темпы ЭАП за период с начала выпадения СМЧ. Определение темпов эрозии производится на основании сравнения запаса СМЧ в изучаемой склоновой почве с запасом СМЧ в эталонном, незэродированном почвенном профиле. В качестве маркеров миграции твердофазного вещества почв нами использовались СМЧ размером от 5 до 30 мкм, различимые в световом микроскопе при 200-кратном увеличении; подсчёт их количества происходит с использованием видеокамеры с суммарным увеличением 1500. Количественный расчёт темпов ЭАП по разнице с эталонным запасом СМЧ может быть реализован с использованием различных подходов. На сегодняшний день расчёты темпов ЭАП проводились с использованием *пропорционального* подхода. В данной статье впервые предлагается усовершенствованный способ расчёта на основе *масс-балансового* подхода. Проведено сопоставление результатов расчётов по двум подходам в пределах модельного малого водосбора «Плавский».

Объект исследования

Объектом исследования стал водосбор отвёршка балки Часовенков Верх, расположенный в Плавском районе Тульской области, в 3 км к западу от д. Петровки. Водосбор имеет площадь около 96 га, перепад высот склонов от днища балки до водораздела составляет 20-40 м, длина склонов – 300-650 м, форма в плане ровная или выпуклая. Склоны водосбора распахиваются вплоть до границы балки, выраженной в рельефе в виде напаша.

На территории водосбора точки опробования располагались вдоль катен с шагом 50 или 100 м (рис. 1). В каждой точке цилиндрическим пробоотборником диаметром 3.2 см отбиралась проба с глубин 0-25 и 25-50 см. В пробах определялось содержание СМЧ. По полученным данным путём интерполяции было определено поле запасов СМЧ в сумме слоёв 0-50 см на всей территории водосбора. Для интерполяции использовался метод «Топо в Растр» в пакете ArcGIS 9.3. Входными данными для построения растра, кроме точек опробования, были проведённые вручную изолинии равного содержания СМЧ между катенами для повышения качества интерполяции. Размер ячейки создаваемого растра 10 м.

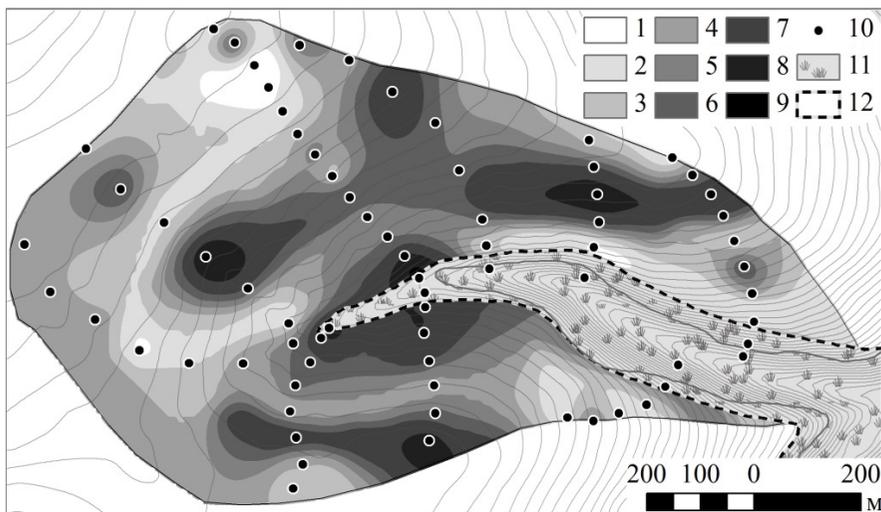


Рис. 1. Картограмма запасов СМЧ в слое 0-50 см. Запасы СМЧ в слое 0-50 см, г/м²: 1 – 2.8-3.5; 2 – 3.6-4.0; 3 – 4.1-4.5; 4 – 4.6-5.0; 5 – 5.1-5.5; 6 – 5.6-6.0; 7 – 6.1-6.7; 8 – 6.8-7.5; 9 – 7.6-9.2; 10 – точки отбора проб; 11 – луг, 12 – граница пашни

Оценка темпов эрозивно-аккумулятивных процессов проводится на основе сравнения количества СМЧ в оцениваемом участке с эталонным количеством СМЧ, накопленным на участке с отсутствием существенного смыва и аккумуляции и находящимся вблизи от объекта исследования. В качестве эталона для рассматриваемого объекта исследования был выбран участок на плоской водораздельной распаханной поверхности в 100 м от северной границы малого водосбора. Запас СМЧ в нём был определён в 10-ти образцах, отобранных случайно-систематическим методом.

Методы расчёта

Пропорциональный подход к расчету темпов эрозивно-аккумулятивных процессов основан на предположении о прямом соответствии убывшего (прибывшего) количества СМЧ смытому (намытому) слою почвы:

$$\frac{h}{H} = \frac{(X_i - X_э)}{X_{э,пах}}$$

где h – слой смытой или намытой почвы, м (искомая величина); H – мощность пахотного горизонта, м; X_i – запас СМЧ на оцениваемом участке по всей глубине их распределения, г/м²; $X_э$ – запас СМЧ на эталонном незеродированном участке по всей глубине их распределения, г/м²; $(X_i - X_э)$ –

убыль количества СМЧ на оцениваемом участке; $X_{э,нах}$ – запас СМЧ в пахотном слое 0-25 см на эталонном неэродированном участке, г/м².

Среднегодовые темпы смыва и намыва почвы d (т/га/год) с учётом плотности почвы на оцениваемом участке ρ (т/м³) можно рассчитать с использованием величины слоя смыва h (м), выведенной из приведённой выше пропорции:

$$d = h \cdot \frac{s \cdot \rho}{T} = \frac{(X_i - X_{э}) \cdot H}{X_{э,нах}} \cdot \frac{s \cdot \rho}{T},$$

где d – темпы смыва почвы, т/га/год, s – площадь 1 гектара в м², принимаемая для расчёта (1 га = 10 000 м²), ρ – плотность почвы, т/м³, T – количество лет от начала интенсивного выпадения СМЧ на поверхность почв до года отбора проб.

Пропорциональная модель характеризуется простотой расчёта темпов смыва и аккумуляции, однако не в полной мере учитывает: а) постепенность накопления СМЧ в почвах, протекающая с 1868 г, с сопутствующим ей смывом вещества на склоновых позициях; б) снижение концентраций СМЧ в областях смыва за счёт припахивания нижележащих горизонтов.

В данной статье предлагается использование нового, *масс-балансового подхода* к расчёту по методу магнитного трассера, позволяющего в первом приближении учесть указанные явления. С этой целью для слоев почвы 0-25 и 25-50 см (соответствуют глубинам отбора образцов на участке исследования) площадью 1 м² были выведены уравнения ежегодного баланса СМЧ, учитывающие приходные (выпадение СМЧ из атмосферы, намыв почвы, запашка нижележащего слоя) и расходные (смыв почвы, переход в нижележащий горизонт за счёт зоотурбаций) составляющие (табл. 1).

Таблица 1. Уравнения ежегодного баланса СМЧ

Слой почвы	Уравнение баланса СМЧ
Области смыва вещества (запас СМЧ на участке ниже эталонного запаса)	
0-25 см	$Z_i^I = Z_{i-1}^I + a_i - b_i - t_i + e_i$
25-50 см	$Z_i^{II} = Z_{i-1}^{II} + t_i - e_i$
Области аккумуляции вещества (запас на участке выше эталонного запаса)	
0-25 см	$Z_i^I = Z_{i-1}^I + a_i + c_i - t_i - g_i$
25-50 см	$Z_i^{II} = Z_{i-1}^{II} + t_i + g_i$

где Z_i^I , Z_{i-1}^I – запасы СМЧ в пахотном слое в i -й год и в предыдущий $i-1$ год; Z_i^{II} , Z_{i-1}^{II} – запасы СМЧ в подпахотном слое в i -й год и в $i-1$ год; a_i – выпадение СМЧ в i -й год; b_i – потери запасов СМЧ за счёт смыва слоя почвы в i -й год; t_i – вынос СМЧ из пахотного слоя в подпахотный за счёт педотурбаций в i -й год; e_i – переход СМЧ из подпахотного слоя в пахотный за счёт припахивания (в областях смыва вещества) в i -й год; g_i – переход СМЧ из пахотного слоя в подпахотный за счёт повышения поверхности (в областях

намыва вещества) в i -й год; c_i – привнос СМЧ за счёт намыва почвы в i -й год;

Для расчётов по масс-балансовому подходу были приняты следующие допущения: 1) равномерность выпадения СМЧ в среднем за каждый год; 2) равномерность интенсивности смыва и намыва почвы в среднем за каждый год; 3) одинаковая ежегодная интенсивность зоотурбаций. Данные допущения позволили следующим образом рассчитывать составляющие баланса СМЧ в почвах:

$$\begin{aligned}a_i &= Z_{\text{з}}/T ; \\b_i &= Z_{i-1}^I \cdot h/H ; \\c_i &= Z_{i-1}^{Is} \cdot k/H ; \\t_i &= Z_{i-1}^I \cdot v ; \\e_i &= Z_{i-1}^{II} \cdot h/H ; \\g_i &= Z_{i-1}^{II} \cdot k/H ;\end{aligned}$$

где v – интенсивность переноса твердофазного вещества из пахотного слоя в подпахотный, происходящая в первую очередь за счёт зоотурбаций, т/га·год; k – слой намыва вещества в год, м; Z_{i-1}^{Is} – запас СМЧ в почвах, являющихся источником твердофазного вещества для намыва, для расчётов принят равным среднему по водосбору запасу.

Реализация масс-балансового подхода была осуществлена за счёт рекурсивных вычислений в пакете Microsoft Excel, в которых значения запаса СМЧ каждого последующего года определялись от запасов СМЧ предыдущего года с прибавлением вышеуказанных приходных и вычитанием расходных пунктов баланса СМЧ. Значения интенсивности вертикального переноса v подбирались такими, чтобы на год отбора образцов (2013) рассчитанное соотношение запасов СМЧ в пахотном и подпахотном слоях стало равно аналитически определённом соотношению на эталонном участке (для малого водосбора «Плавский» 61% и 39%, соответственно).

Для определения соответствия между интенсивностью смыва почвы и запасом СМЧ в рекурсивную счётную таблицу (в пакете Microsoft Excel) с введёнными формулами ежегодного баланса подставляются различные значения ежегодного слоя смыва h – 0 мм, 0,1 мм, 0,2 мм и далее до 5 мм. Значение запаса СМЧ рассчитывается для каждого года от момента строительства железной дороги до года отбора проб; формула в значении запаса на конкретный год зависит от значения запаса в предыдущем году и от остальных уравнений ежегодного баланса. Для каждого значения слоя смыва (h) вычислялись значения запасов СМЧ, накопленных в почве на год отбора проб. Переход от слоя смыва h (м) к темпам смыва d (т/га в год) проводился с учётом плотности почвы ρ (т/м³). Полученный набор соответствий «*темпы смыва d* » – «*запас СМЧ z* » для малого водосбора «Плавский» был ис-

пользован для построения полиномиального уравнения регрессии для смыва: $d = -0.2163z^4 + 4.0018z^3 - 29.371z^2 + 112.8z - 198.59$ ($R^2 = 1$) (рис. 2).

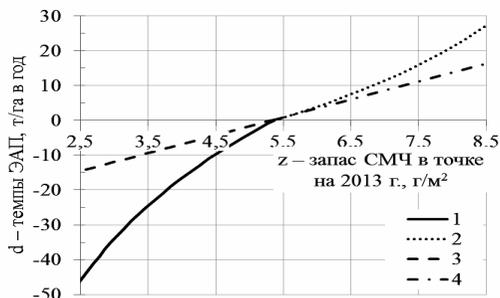


Рис. 2. Градуировочные графики для определения интенсивности смыва вещества почв для малого водосбора «Плавский». 1 – смыв (масс-балансовая модель); 2 – намыв (масс-балансовая модель); 3 – смыв (масс-балансовая модель); 4 – намыв (пропорциональная модель).

Данное уравнение использовалось для расчёта темпов смыва по аналитически определённым значениям запаса СМЧ. Отметим, что найденное уравнение регрессии может быть использовано только для участка исследования «Плавский», для расчёта темпов смыва на других участках необходимо построение собственного уравнения.

Результаты и обсуждение

Для характеристики эрозионно-аккумулятивных процессов были составлены две карты темпов ЭАП, рассчитанные по пропорциональному и масс-балансовому подходам (рис. 3) на основании карты запасов СМЧ. Запас СМЧ на эталонном участке составил $4,87 \text{ г/м}^2$ с доверительным интервалом от 4,24 до 5,50 при $p = 0,95$ и коэффициентом вариации 18%. Разброс значений запасов СМЧ в пахотных почвах малого водосбора составляет от 2,6 до $9,6 \text{ г/м}^2$ в слое 0-50 см, что превосходит пределы аналитической и природной вариабельности, выявленной для водораздельной поверхности.

Сравнение двух карт, построенных по различным подходам к расчётам, указывает на разницу в абсолютных единицах темпов при сохранении общей пространственной структуры ЭАП. В пространственной структуре выявляется спорадически-полосчатое расположение ареалов смыва и аккумуляции твердофазного вещества почв, вытянутых поперёк падению склонов. Такие ареалы особенно хорошо заметны на склоне южной экспозиции: приводораздельная область интенсивного смыва сменяется областью аккумуляции, находящейся в средней части склона; ниже снова формируется зона смыва, занимающая полосу вдоль границы пашни. На склоне северной экспозиции ареалы смыва выражены слабее, но также в средней и верхней части склона наблюдается область аккумуляции. Длинные склоны восточной экспозиции имеют в своей пространственной структуре более широ-

кие ареалы смыва, приуроченные как к верхним, так и нижним частям катен.

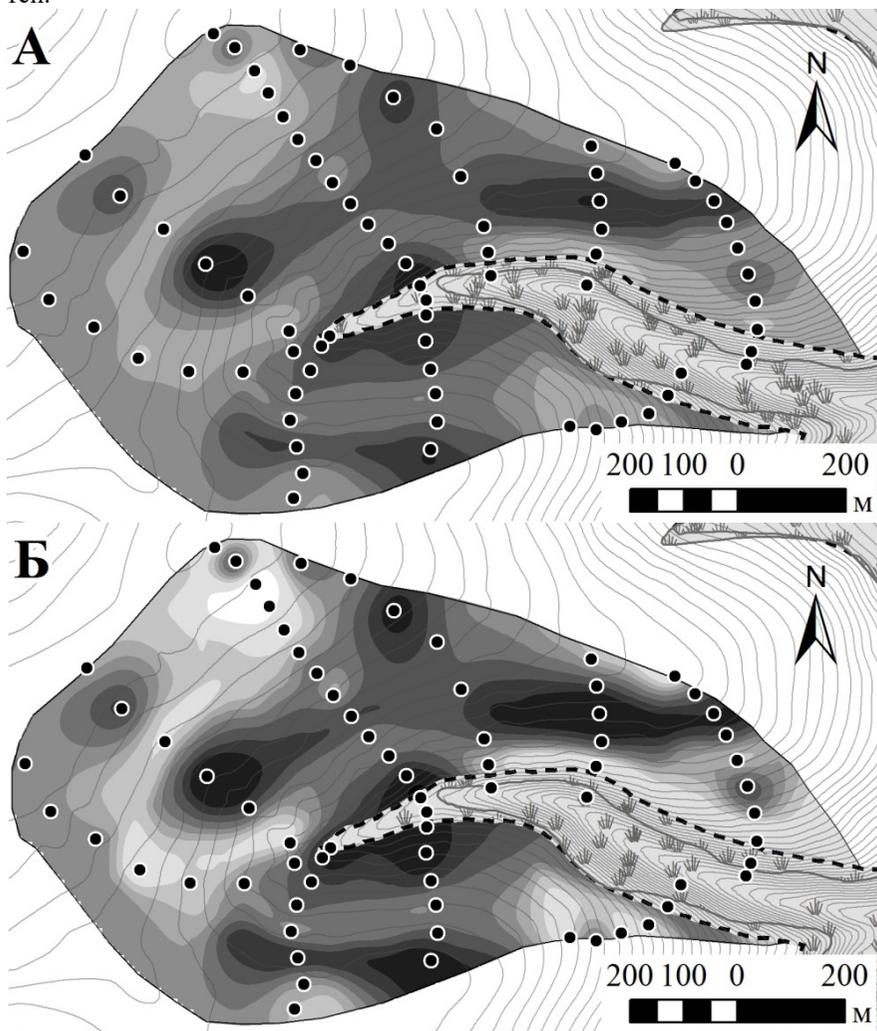


Рис. 3. Карта-схема темпов эрозионно-аккумулятивных процессов, рассчитанных по пропорциональной (А) и масс-балансовой моделям (Б). Темпы смыва, т/га в год: 1 – 25-45; 2 – 15-24; 3 – 10-14; 4 – 5-9; 5 – 0-5; темпы аккумуляции: 6 – 0-5; 7 – 6-10; 8 – 11-15; 9 – 16-25; 10 – 25-45. 11 – точки отбора проб, 12 – горизонтали, шаг 1 м, 12 – луг; 14 – граница пашни

В карте, составленной с использованием расчётов по масс-балансовому подходу, ареалы смыва характеризуются более высокими темпами, в сравнении с пропорциональным подходом. При малых темпах смы-

ва разница между двумя подходами к расчёту незначительна, но при возрастании темпов она увеличивается до двух раз и более (рис. 4).

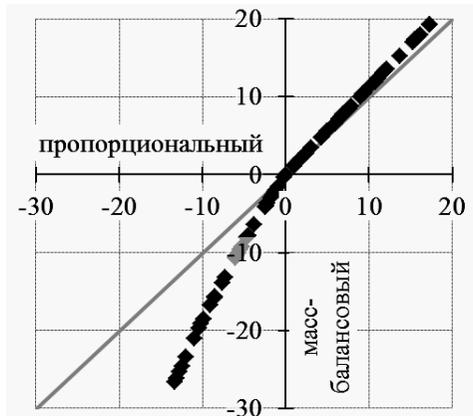


Рис. 4. Диаграмма соответствия для темпов смыва (-) и аккумуляции (+) твердофазного вещества почв (т/га в год), рассчитанных по пропорциональному и масс-балансовому подходам к расчёту для точек исследования

Суммарная площадь ареалов с темпами смыва, превышающими 15 т/га в год, значительно выше при расчёте по масс-балансовому подходу, чем по пропорциональному подходу (рис. 5). Площадь транзитно-буферного пространства (ареалы с интенсивностью миграции от -5 до +5 т/га в год) отличается менее существенно, площадь под ареалами аккумуляции близка в обоих подходах к расчёту.

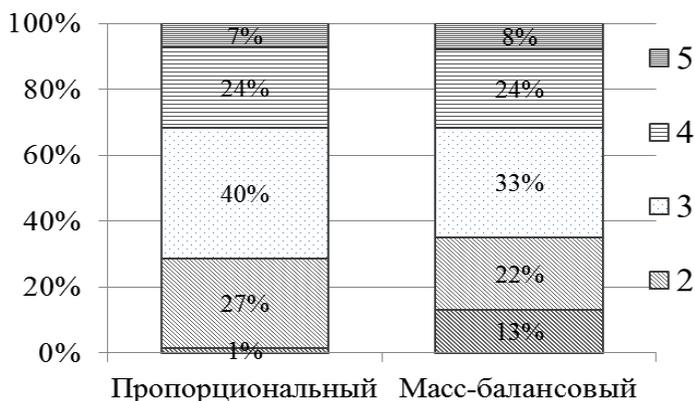


Рис. 5. Соотношение суммарной площади ареалов в пахотной части малого водосбора при различных подходах к расчёту. 1 – темпы смыва интенсивнее -15 т/га в год; 2 – темпы смыва от -5 до -15 т/га в год; 3 – темпы миграции от -5 до +5 т/га в год; 4 – темпы аккумуляции от 5 до 15 т/га в год; 5 – темпы аккумуляции более 15 т/га в год.

Выводы

Для количественной оценки темпов ЭАП по методу магнитного трассера могут быть использованы пропорциональный и масс-балансовый подходы. Пространственная структура ЭАП практически не изменяется в зависимости от способа расчета. Однако при расчёте по масс-балансовому подходу в сравнении с пропорциональным выявлены более высокие значения темпов смыва почв. Различия в темпах ЭАП – низкие для малых темпов смыва и достигают 2-3 раз для высоких темпов смыва.

Возможно, темпы смыва, получаемые при расчёте по пропорциональному подходу, могут быть занижены в сравнении с реальными темпами вследствие непостоянной во времени концентрации СМЧ в почвах с областью смыва, которая постепенно возрастает во время периода выпадения СМЧ и снижается при смыве почвенного материала, содержащего СМЧ. Темпы смыва, получаемые при расчёте по масс-балансовому подходу, могут быть завышены в сравнении с реальными темпами из-за неравномерной интенсивности смыва по годам [Беляев, 2003]. В дальнейшем необходимо включение параметров данной неравномерности в масс-балансовую модель, а также принятие во внимание особенностей радиального распределения магнитных сферул в почвенном профиле. Также желательно сравнение получаемых данных с иными традиционными методами измерения эрозионно-аккумулятивных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. Ярославль: ЯГТУ. 1995.

Беляев В.Р., Маркелов М.В., Голосов В.Н., Бонте Ф, Иванова Н.Н. Использование ^{137}Cs для оценки современной агрогенной трансформации почвенного покрова в районах чернобыльского загрязнения // Почвоведение. 2003. №7.

Геннадиев А.Н., Голосов В.Н., Чернянский С.С., Маркелов М.В., Беляев В.Р., Иванова Н.Н., Ковач Р.Г. Сравнительная оценка содержания в почвах магнитных сферул, ^{137}Cs и ^{210}Pb для целей индикации эрозионно-аккумулятивных процессов // Почвоведение. 2006. № 10.

Геннадиев А.Н., Голосов В.Н., Чернянский С.С., Маркелов М.В., Олсон К.Р., Ковач Р.Г., Беляев В.Р. Анализ сопряженного использования радиоактивного и магнитного трассеров для количественной оценки эрозии почв // Почвоведение. 2005. Т. 9.

Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон К.Р., Качинский В.Л. Эрозия и потери органического углерода при распашке склонов // Вест. Моск. ун-та, Серия 5. География. 2010. № 6.

Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Жидкин А.П., Ковач Р.Г. Латеральная миграция твердофазного вещества почв в пределах ландшафтно-геохимической арены (метод магнитного трассера) // Почвоведение. 2013. № 10.

Геннадиев А.Н., Олсон К.Р., Чернянский С.С., Джоунс Р.Л. Количественная оценка эрозионно-аккумулятивных явлений в почвах с помощью техногенной магнитной метки // Почвоведение. 2002. № 1.

Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Ковач Р.Г. Сферические магнитные частицы как микрокомпоненты почв и трассеры массопереноса // Почвоведение. 2004. № 5.

Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Олсон К.Р., Ковач Р.Г. Индикация параметров массопереноса в почвах по содержанию сферических магнитных частиц // Вест. Моск. ун-та, Серия 5. География. 2005. № 3.

Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Р., Маркелов М.В., Жидкин А.П., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г. Пространственно временные особенности развития почвенно-эрозионных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7.

Жидкин А.П. Оценка эрозионных процессов методом магнитного трассера в почвах малого водосбора (Курской области) // География и природные ресурсы. 2010. № 1.

Жидкин А.П., Голосов В.Н., Светличный А.А., Пяткова А.В. Количественная оценка перераспределения наносов на пахотных склонах на основе использования полевых методов и математических моделей // Геоморфология. 2015. № 2.

Olson K. R., Gennadiyev A. N., Golosov V. N. Comparison of fly-ash and radio-cesium tracer methods to assess soil erosion and deposition // Soil Science. 2008. Vol. 173. N. 8.

Olson K.P., Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Markelov M.V., Golosov V.N., Lang J.M. The use of fly ash to determine the extent of sediment transport and deposition on a nearly level Western Illinois landscape // Soil Science. 2013. Vol. 178. N. 1.

Olson K.R., Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Markelov M.V. Impact of land use, slope and erosion on soil organic carbon retention and storage // Soil Science. 2012. Vol. 177. N. 4.

Olson K.R., Jones R.L., Gennadiyev A.N., Chernyanskii S.S., Woods W.I., Lang J.M. Soil catena formation and erosion of two Mississippian mounds at the Cahokia archaeological site, Illinois // Soil Science. 2003. Vol. 168, N. 11.

О.А. Борсук, С.Н. Ковалев

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭРОЗИОННОГО РЕЛЬЕФА В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ ДРЕВНЕЙ РУСИ

Градостроительство Древней Руси развернулось в речных долинах европейской части России с X века. Возведение городов – крепостей на водных торговых путях, во-первых, шло с использованием естественных природных фортификаций, различного вида останцов в речных долинах и на мысах при соединении притоков с главной рекой. Широко использовались при строительстве городов выровненные поверхности речных террас. Овражно-балочная сеть играла роль рвов, окружающих крепость, небольшая подработка подрезка их склонов и искусственное соединение верховьев оврагов, пересекающих мысы при впадении притоков (например, р. Которос-