

УДК 551.4.012; 551.435.1

М.М. Иванов¹, В.Н. Голосов^{2,3}, В.Р. Беляев⁴

АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ДОСТАВКИ НАНОСОВ БАСЕЙНА РЕКИ ПЛАВЫ (ТУЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Основным механизмом перераспределения твердого вещества в речных бассейнах является деятельность эрозионно-аккумулятивных процессов. Строение рельефа – основной фактор пространственной дифференциации данного процесса. Анализ строения речного бассейна, классификация его элементов и сбор полевых данных по выделенным классам элементов позволяют производить оценку роли рельефа во внутрибассейновом перераспределении наносов. При этом наиболее подходящим количественным показателем, характеризующим речной бассейн как систему по перераспределению твердого вещества, является так называемый коэффициент доставки наносов (КДН). Была произведена оценка КДН для отдельных элементов водосбора р. Плавы и всего бассейна в целом. Учитывая, что исследуемый объект находится в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения, полученные данные являются полезными с точки зрения оценки радиоэкологической угрозы и потенциальных рисков заражения речного стока.

Ключевые слова: эрозионно-аккумулятивные процессы, баланс наносов, коэффициент доставки, бассейны малых рек, радиоактивное загрязнение, Среднерусская возвышенность.

Введение. Речной бассейн представляет собой сложную геоморфологическую систему, основу структуры которой составляют эрозионно-аккумулятивные процессы [Маккавеев, 1955; Симонов, Симонова, 2004]. Наиболее часто используемым подходом для количественной оценки деятельности данных процессов в пределах речного бассейна или какой-либо его части является оценка баланса вещества (наносов), рассчитываемого по разности между мобилизованными различными геоморфологическими процессами (в общем случае, не только эрозионно-аккумулятивными) и вынесенными за его пределы объемами наносов [Голосов, 2006]. Речной бассейн в целом обладает отрицательным балансом, поскольку при отсутствии привноса вещества извне постоянно происходит вынос определенного количества рыхлого материала главной рекой через устьевой створ. Однако в связи с пространственной неравномерностью процесса перераспределения наносов внутри речного бассейна баланс наносов для отдельных звеньев бассейна имеет не только разную величину, но и может менять свой знак [Robinson, 1977; Roehl, 1962]. Значительная доля рыхлого материала, вовлекаемого в перенос флювиальными процессами, переоткладывается внутри бассейна. Соответственно для каждого элемента пространственной структуры речного бассейна может быть оценено соотношение объемов мобилизованных (вовлеченных в перенос) на заданном участке и вынесенных за его пределы наносов. Данное соотношение получило название *коэффициента доставки наносов* (КДН) [Дедков, Мозжерин, 1984] или,

в англоязычной литературе, *sediment delivery ratio* (SDR) [Walling, 1983]. Фактически КДН является показателем эффективности бассейна (или его части) как системы, в отношении транспорта мобилизованных наносов [Hinderer, 2012].

Знание значения КДН для конкретного водосбора позволяет оценить не только количество вещества, транспортируемого в пределах бассейна при наблюдаемых темпах денудации на его территории, но и объемы миграции переносимых с наносами химических компонентов, включая загрязняющие вещества [Ларионов, 2002; Wang et al., 2010]. В данной работе подробно рассмотрено перераспределение наносов на участках от склонов междуречий до долин постоянных водотоков, то есть процесс формирования бассейновой составляющей стока наносов.

В качестве объекта исследований был выбран бассейн р. Плавы, расположенный в южной части Тульской области. Данный бассейн представляет собой большой интерес не только с геоморфологической (он достаточно типичен по характеру рельефа для северной части Среднерусской возвышенности), но и с радиоэкологической точки зрения, так как он расположен в зоне с максимальными уровнями Чернобыльского радиоактивного загрязнения [Атлас радиоактивного загрязнения ..., 1998].

Постановка проблемы. Величина КДН речных бассейнов территории преобладания сельскохозяйственного землепользования определяется целым набором характеристик, включая морфометрию склонов междуречий, рисунок и состояние русел

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, млад. науч. сотр.; e-mail: ivanovm@bk.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, вед. науч. сотр., докт. геогр. н.; e-mail: golossov@gmail.com

³ Казанский федеральный университет, Институт экологии и природопользования, вед. науч. сотр., докт. геогр. н.

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., ст. науч. сотр.; e-mail: vladimir.r.belyaev@gmail.com

современной гидрографической сети, особенности расположения участков пашни и других сельскохозяйственных угодий относительно различных элементов флювиальной сети, существующую систему землепользования, характеристики почвенного покрова [Walling, 1983], наличие и особенности размещения антропогенных рубежей стока линейной или площадной локализации [Голосов, 2006] и др. Однако ключевую роль для определения КДН среди перечисленных выше параметров играет геоморфологическое строение территории, так как оно предопределяет энергию стока воды и пути транспортировки вещества. Для количественной оценки влияния геоморфологического строения (для существующего типа землепользования) на КДН в речном бассейне необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Если пространственная дифференциация процесса перераспределения наносов обусловлена главным образом геоморфологическим строением территории (при всех прочих равных условиях), то справедливо положение, что морфологически сходные элементы рельефа или их сочетания воздействуют на данный процесс сходным образом [Кружалин с соавт., 1981; Скрипко, 2012]. Выделение групп сходных по морфологии звеньев речного бассейна позволяет рассматривать на примере отдельных ключевых водосборов.

2. Полевые исследования ключевых объектов позволяют получить фактические количественные данные об объемах перераспределения наносов в каждом из них, достоверность которых определяется использованием независимых методов, которые могут быть откалиброваны и взаимно верифицированы.

3. Третьей задачей является непосредственный расчет КДН. Ее решение на количественной основе возможно только при наличии данных, полученных на предыдущих этапах.

Материалы и методы исследований. Общая характеристика бассейна р. Плавы. Река Плава располагается в южной части Тульской области и принадлежит к бассейну Оки, являясь левым притоком одного из ее основных правых притоков на субмеридиональном участке – р. Упы. Бассейн реки Плав находится в пределах наиболее приподнятой части Среднерусской возвышенности (так называемое Плавское плато с максимальными абсолютными высотами более 290 м), представляющей собой водораздел между бассейнами Оки (Зуша, Плава, Упа) и Дона (Красивая Меча). Наивысшей точкой всей возвышенности можно считать вершину водораздела рек Зуши и Плав с абсолютной отметкой 293,2 м (в Тепло-Огаревском районе). Для всего юга Тульской области характерен пологоволнистый возвышенный равнинный рельефа с сильным эрозионным расчленением. Глубина эрозионного вреза составляет 70–80 м. Среднегодовое количество осадков в регионе составляет порядка 600 мм/год (по данным Росгидрометцентра по г. Тула за 1961–1990 гг.).

Исследуемый объект расположен в лесостепной зоне, где в плакорных условиях основными типами почв являются серые лесные почвы, выщелоченные и оподзоленные черноземы. Интенсивное сельскохозяйственное освоение территории привело к тому, что практически все естественные ландшафты были заменены агроландшафтами. Активная распашка склонов междуречий и приводораздельных поверхностей приводит к уничтожению естественного растительного покрова и интенсификации процесса смыва почвенных частиц дождевыми и талыми водами.

Типизация элементов структуры бассейна р. Плав. Выделение отдельных морфологически однородных составляющих речного бассейна позволяет характеризовать всю группу по ее типичному отдельному представителю. Подобный подход обладает существенным недостатком в виде отсутствия учета вариабельности проявления процесса перераспределения наносов в пределах выделяемых групп, но позволяет проводить экстраполяцию эмпирических данных на территории, по площади превышающей контрольные участки.

Ввиду того, что речной бассейн является многоуровневой системой, принцип иерархичности должен быть заложен в основу создаваемой классификации. Разделение на уровни требует четкого формального показателя, в качестве которого нами используется дихотомическая система кодирования порядков Стралера–Философова [Horton, 1945; Филосовов, 1960], предложенная первоначально для определения порядка водотоков. Данная схема может быть также применена для классификации тальвегов и склонов всей флювиальной сети в целом (вне зависимости от наличия или отсутствия постоянного водотока) [Бондарев с соавт., 2014]. В конкретном случае реализация данной схемы производилась при помощи пакета программ MapInfo 10.2.5.

На первом этапе разделение бассейна на уровни производилось путем выделения водосборов различного порядка на основе использования государственной топографической карты масштаба 1:100 000. Поскольку наш анализ ограничивается оценкой бассейновой составляющей стока наносов, то есть доставкой материала до русел рек и ручьев, для дальнейшего анализа в качестве элементарных клас-

Таблица 1

Соотношение водосборов различного порядка с речной сетью бассейна р. Плав

Порядок водосбора	Соответствующий постоянный водоток
7	Плава (ниже слияния с Холохольней)
6	Плава, Холохольня
5	Малынь, Локна, Сорочка
4	Железица, Казарка
3	Калиновка
2	—
1	—

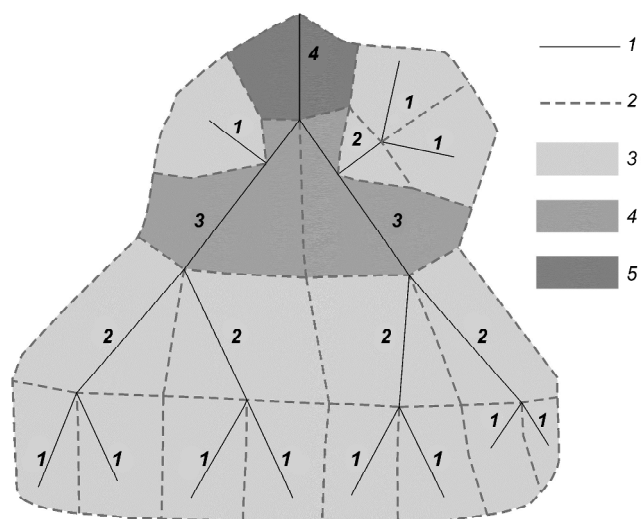


Рис. 1. Принципиальная схема выделения водосборов верхних звеньев флювиальной сети и элементарных склонов (объяснение в тексте). Условные обозначения: 1 – тальвеги; 2 – водоразделы; 3 – водосборы верхних звеньев флювиальной сети первого и второго порядков; 4 – элементарные склоны третьего порядка; 5 – элементарные склоны четвертого порядка

Fig. 1. Principal scheme of morphometric classification of headwater catchments and elementary slopes (details in the text). 1 – thalweg lines; 2 – watershed lines; 3 – headwater catchments (first and second Hortonian order); 4 – third-order elementary slopes; 5 – fourth-order elementary slopes

сификационных единиц использовались водосборы временных водотоков. Водосборы малых рек и ручьев рассматривались как совокупность водосборов временных водотоков более низкого порядка и элементарных склонов. В силу этого из данной классификации отбрасываются все водосборы выше четвертого порядка, а также часть водосборов более низких порядков, имеющих постоянные водотоки: Железица, Казарка, Калиновка и т. д.

На втором этапе производилось выделение групп по морфологическому признаку – степени выраженности дна долины, играющего важную роль в транспорте и переотложении наносов. Сразу же следует выделить водосборы третьего и четвертого порядков, для которых в масштабе карты 1:100 000 удастся достоверно определить наличие морфологически обособленного дна. Ввиду того, что группу водосборов третьего порядка составляет достаточно большое количество объектов, для выбора наиболее репрезентативных представителей было произведено деление на группы, исходя из размеров водосбора. В качестве дополнительного количественного показателя, характеризующего размер, использовалась суммарная длина тальвегов более низких порядков в пределах конкретного водосбора. Выбор данного показателя был обусловлен тем, что его значение в конечном итоге определяется двумя фак-

торами: площадью водосбора и густотой эрозионного расчленения. Конкретные границы выделяемых интервалов определялись на основе анализа кривой распределения указанных показателей. Были выделены 3 группы водосборов: малые, средние и большие.

Большую проблему составляет типизация водосборов 1 и 2 порядков (рис. 1). Мелкий масштаб карты не позволяет жестко соотнести порядок тальвега с фактом наличия морфологически обособленного дна. Поэтому было принято решение отнести эти водосборы к единой категории – верхних звеньев флювиальной сети. Дальнейшая их типизация проводилась на основе формы продольного профиля главного тальвега, которая во многом определяет преобладание эрозии, транзита или переотложения наносов в днах. Были выделены две группы водосборов: с вогнутым и выпуклым продольными профилями главных тальвегов.

На завершающем этапе, в зависимости от плановых очертаний, все элементарные склоны, опирающиеся непосредственно на борта эрозионных долин и не входящие в состав водосборов первого и второго порядков (верхние звенья флювиальной сети), были подразделены на 3 группы: прямые в плане, концентрирующие сток (вогнутые в плане), рассеивающие сток (выпуклые в плане).

Полевые наблюдения. Выполненная типизация элементов структуры бассейна р. Плавы позволяет отнести отдельные детально исследованные клю-

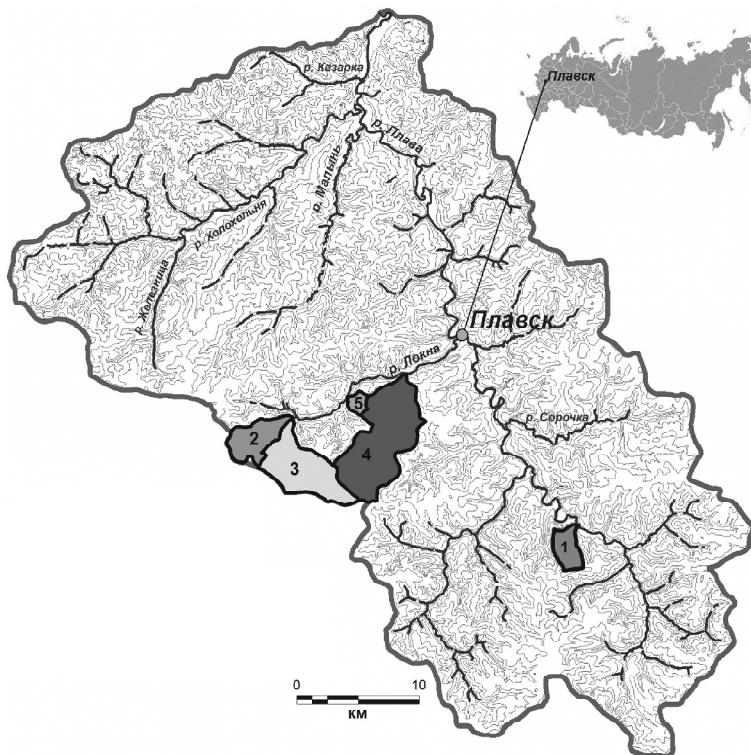


Рис. 2. Схема расположения ключевых детально изученных водосборов в бассейне р. Плавы. Условные обозначения: 1 – Ляпуновка; 2 – Верхняя Локна западная; 3 – Верхняя Локна восточная; 4 – Часовенков Верх; 5 – Лапки

Fig. 2. Scheme of key catchments of the Plava River basin for which the detailed field studies have been carried out. 1 – Lyapunovka; 2 – Upper Lokna western; 3 – Upper Lokna eastern; 4 – Chasovenkov Verh; 5 – Lapki

чевые объекты к определенному из выделенных типов. Полевые исследования проводились на пяти малых водосборах (рис. 2). Набор методов, используемый для каждого конкретного объекта, может быть различен, но их выбор определяется соотношением задачи оценки баланса наносов на конкретном участке. Для получения достоверных и взаимно верифицируемых результатов используются независимые способы оценки объемов эрозируемого и аккумулярованного материала. В условиях интенсивного чернобыльского загрязнения наиболее продуктивным является использование искусственного радиоизотопа ^{137}Cs в качестве радиоактивной метки. Его вертикальное распределение в толще наносов позволяет определять объем аккумуляции за период с момента выпадения на дневную поверхность [Голосов, 2000; Panin et al., 2001], а латеральное распределение в пределах склонов дает возможность применения калибровочных моделей эрозии, увязывающих относительные изменения запасов радионуклидов и темпы перераспределения материала [Quine, 1989; Walling, He, 1999]. Также для оценки интенсивности процессов перераспределения наносов может быть использован ряд математических моделей эрозии и результаты прямых полевых наблюдений [Бобровицкая, 1977; Wishmeier, Smith, 1978; Ларионов, 1993; Belyaev et al., 2008].

Методика оценки КДН. Полученные в результате полевых исследований количественные оценки различных составляющих баланса наносов были использованы для расчета КДН для разных классов частей флювиальной сети. Показатель КДН может быть разложен на ряд элементарных составляющих в зависимости от сложности структуры водосборного бассейна, для которого он вычисляется [Vigiak et al., 2012].

Базовая формула для оценки общего КДН для заданного неделимого в рамках морфологической классификации участка водосбора (расчетный полигона) выглядит следующим образом:

$$SDR_{int} = SDR_s \times SDR_n \times SDR_{n+x} \times \dots \times SDR_{n+N}, \quad (1)$$

где SDR_{int} – общий КДН для элементарного полигона; SDR_s – КДН типа элементарного склона или верхнего звена флювиальной сети, к которому принадлежит участок; SDR_n – КДН долины соответствующего порядка, к которой прилегает рассматриваемый участок; $SDR_{n+x} \times \dots \times SDR_{n+N}$ – произведение КДН долин, по которым происходит движение наносов вплоть до впадения в реку (SDR_{n+N} – КДН долины с максимальным порядком без постоянного водотока).

Ниже приведены общие формулы (2–10), которые используются для отдельных сомножителей в уравнении 1.

Оценка КДН элементарных склонов и верхних звеньев флювиальной сети. Член уравнения SDR_s может быть выражен в виде одного из ниже представленных уравнений (2–6), в зависимости от принадлежности полигона к тому или иному типу склона или верхнего звена флювиальной сети:

$$SDR_{s1c} = W_{s1c} / (X_{s1c} \times S_{s1c}), \quad (2)$$

$$SDR_{s1d} = W_{s1d} / (X_{s1d} \times S_{s1d}), \quad (3)$$

$$SDR_{s1s} = W_{s1s} / (X_{s1s} \times S_{s1s}), \quad (4)$$

$$SDR_{s1w}^{concave} = W_{s1w}^{concave} / (X_{s1w}^{concave} \times S_{s1w}^{concave}), \quad (5)$$

$$SDR_{s1w}^{convex} = W_{s1w}^{convex} / (X_{s1w}^{convex} \times S_{s1w}^{convex}), \quad (6)$$

где показатели для соответствующих типов склонов и верхних звеньев сети: X – средний темп смыва, т/га/год; S – площадь склона(ов), га; SDR – коэффициент доставки наносов соответствующего типа склона или верхнего звена флювиальной сети.

Оценка КДН долин первого порядка:

$$SDR_1 = W_1 / W_{s1}, \quad (7)$$

где W_1 – объем наносов, выносимых за пределы долин 1 порядка, т; W_{s1} – объем наносов, выносимых за пределы склонов и верхних звеньев флювиальной сети, примыкающих к долинам первого порядка, т; SDR_1 – коэффициент доставки наносов для долин первого порядка.

$$W_{s1} = W_{s1c} + W_{s1d} + W_{s1s} + W_{s1w}, \quad (8)$$

$$W_{s1w} = W_{s1w}^{concave} + W_{s1w}^{convex}, \quad (9)$$

где W_{s1c} – смыв с концентрирующих склонов, т; W_{s1d} – смыв с рассеивающих склонов, т; W_{s1s} – смыв со склонов с прямым плановым очертанием, т; W_{s1w} – вынос за пределы верхних звеньев флювиальной сети, т; $W_{s1w}^{concave}$ – объем наносов, выносимых за пределы верхних звеньев флювиальной сети с вогнутым продольным профилем, т; W_{s1w}^{convex} – объем наносов, выносимых за пределы верхних звеньев флювиальной сети с выпуклым продольным профилем, т.

Объем выноса для водосборов второго порядка:

$$SDR_2 = W_2 / (W_{s2} + W_{1-2}), \quad (10)$$

где W_2 – объем наносов, выносимых за пределы долин второго порядка, т; W_{s2} – объем наносов, выносимых за пределы склонов, примыкающих к долинам второго порядка, т; W_{1-2} – объем наносов, выносимых за пределы долин первого порядка, примыкающих к долинам второго порядка, т; SDR_2 – коэффициент доставки наносов для долин второго порядка (без долин первого порядка).

Результаты. Анализ структуры флювиальной сети бассейна р. Плавы. Хортон-анализ позволил выделить 153 водосбора третьего порядка и 38 водосборов четвертого порядка. Водосборы третьего порядка были разделены согласно приведенной выше типизации по соотношению площади и суммарной длины тальвегов более низких порядков (рис. 3). Морфометрический анализ топографической карты позволил выделить около 4000 полигонов, соответствующих элементарным склонам и водосборам верхних звеньев флювиальной сети, и соотнести их с описанными выше типами (рис. 4).

К выделенным полигонам привязана таблица атрибутивных данных, в которой зафиксированы показатели площади полигонов. На основе данной таблицы получена статистика распределения выде-

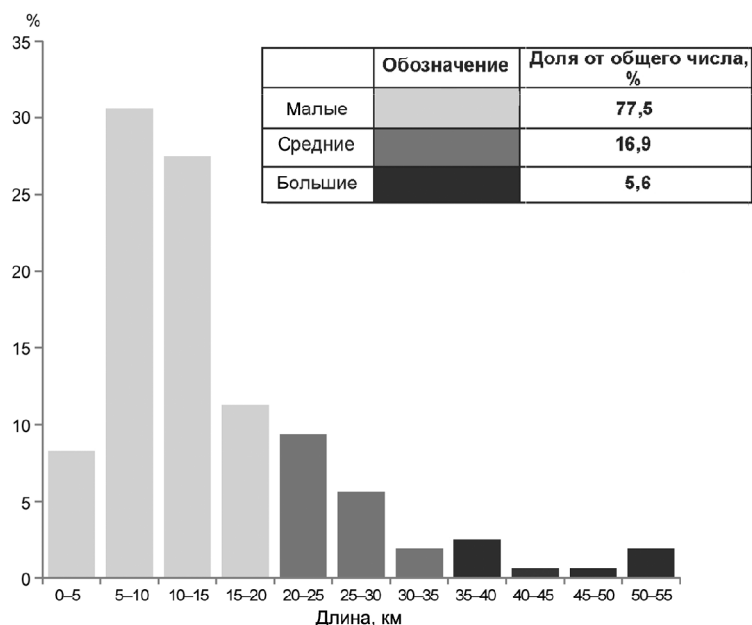


Рис. 3. Распределение суммарной длины тальвегов первого-второго порядков внутри водосборов третьего порядка и их подразделение на группы по типам

Fig. 3. Distribution curve of the total length of first and second-order thalwegs within the third-order basin and their classification into types

ленных полигонов по обозначенным классам. Также подсчитаны площади и доли данных групп от общей площади бассейна р. Плавы (табл. 2). Необходимо отметить, что площади полигонов в данном случае включают разные элементы рельефа, поскольку в качестве их границ принимались только линии тальвегов и водоразделов, но не бровки и тыловые швы. Это связано с генерализацией отображения рельефа на топографических картах масштаба 1:100 000, а также с ограничением трудоемкости и времязатратности работ. Таким образом, например, в состав каждого из полигонов, которые мы относим к «элементарным» склонам, на самом деле входят, помимо нерасчлененных тальвегами участков склонов междуречий, фрагменты прилегающего участка бровки и борта долины, на которую данный склон опирается. А участок дна долины «аппроксимируется» линейным объектом – тальвегом.

Результаты полевых исследований.

Анализ распределения современных запасов ^{137}Cs в пределах водосбора р. Лапки [Panin et al., 2001] дал возможность соотнести интенсивность перераспределения рыхлого материала с выделенными морфологическими типами склонов и водосборов (табл. 3). Полученные результаты наглядно демонстрируют, что активное переотложение наносов начинается уже в пределах склонов и зачастую составляет более половины смываемого материала. Высокая вариабельность показателя КДН приводит к контрастной про-

странственной дифференциации областей преобладания сноса и аккумуляции. Оценка объемов перераспределения наносов на рассмотренных пяти ключевых водосборах позволила получить следующее распределение КДН в выделенных типах водосборов (табл. 4): с возрастанием порядка водосбора существенно уменьшается КДН, что свидетельствует о резком сокращении доли смытых со склонов наносов, доставляемых временными потоками в днища долин постоянных водотоков. Данный вывод хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями баланса наносов малых водосборов сельскохозяйственно освоенных равнин в умеренном гумидном климате, которые показали существование четкой обратной зависимости между площадью водосбора и величиной КДН [Голосов, 2006].

Результаты расчета КДН. Полученные значения общего КДН были использованы в качестве количественных атрибутивных данных к карте полигонов (рис. 4) для создания карты распределения общего КДН для всего бассейна р. Плавы (рис. 5). Из представленной схемы видно,

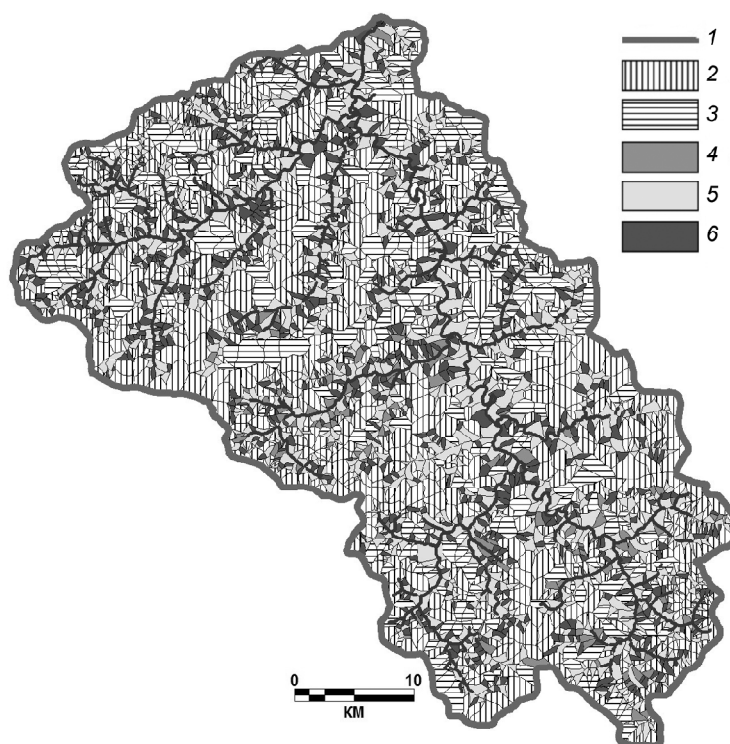


Рис. 4. Схема распределения различных типов водосборов верхних звеньев флювиальной сети и элементарных склонов в бассейне р. Плавы. Условные обозначения: 1 – постоянные водотоки; водосборы верхних звеньев флювиальной сети: 2 – с выпуклым и 3 – с вогнутым продольным профилем тальвега; элементарные склоны: 4 – прямые, 5 – рассеивающие и 6 – концентрирующие по форме в плане

Fig. 4. Scheme of different types of headwater catchments and elementary slopes within the Plava River basin. 1 – perennial streams; headwater catchments with: 2 – convex and 3 – concave thalweg log profile; elementary slopes with: 4 – straight, 5 – dissipative and 6 – concentrative plan form

что основной зоной, питающей днища долин малых рек бассейна Плавы, являются водосборы, непосредственно примыкающие к долинной сети. Этот результат также хорошо согласуется с результатами ранее проведенных полевых исследований [Безухов с соавт., 2014]. Наличие сухих долин относительно высоких порядков приводит к четкому выделению зон с общим низким КДН. Однако из-за того, что на их долю приходится значительные площади, вклад объема наносов, поступающего в днища долин малых рек с этой части бассейна, достаточно велик.

Следует отметить, что данная карта (рис. 5) не учитывает фактическое современное землепользование и его изменения во времени, за исключением того, что при расчете КДН учитывалось, что днища долин всех порядков задернованы и поэтому являются зонами преимущественной аккумуляции. Влияние других факторов, а именно степени смытости и противозрозийной устойчивости почв, гидрометеорологических

Таблица 2

Статистика распределения доли случаев и площади типов водосборов верхних звеньев флювиальной сети и элементарных склонов в бассейне р. Плавы (общая площадь бассейна 1853,5 км²)

Водосбор	Число полигонов, шт	Доля от общего количества, %	Общая площадь, км ²	Доля от общей площади, %
Типы водосборов верхних звеньев флювиальной сети				
С выпуклым продольным профилем	902	23,4	758,62	40,9
С вогнутым продольным профилем	282	7,3	321,52	17,3
Типы элементарных склонов				
Прямые	145	3,8	51,44	2,8
Рассеивающие	1743	45,4	500,5	27
Концентрирующие	776	20,1	221,42	12

$$SDR_{basin} = \frac{\sum_N SDR_{intn} S_n}{S_{общ}}, \quad (11)$$

где SDR_{basin} – КДН бассейна Плавы; SDR_{intn} – общий КДН для конкретного полигона; S_n – площадь отдельного полигона; $S_{общ}$ – площадь бассейна.

Согласно результатам расчетов по формуле (11), около 29% потенциально смываемых со склонов бассейна Плавы наносов доставляется временным стоком в днища долин постоянных водотоков. Данный результат в последующем может быть уточнен с определением точных границ областей сноса. Следует отметить, что данный показатель лишь на 10% превышает существующую оценку КДН для фактического землепользования [Belyaev et al., 2012], согласно которой в днища долин Плавы и ее притоков выносятся не более 19,7% смываемых с распаханых водосборных склонов наносов.

Перспективы дальнейших исследований. Существует ряд проблем, связанных с проведенной оценкой, которые требуют рассмотрения в будущем. В целом их можно разделить на две группы. Первую составляют проблемы, связанные с точностью и на-

Таблица 3

Оценочные величины КДН выделенных типов водосборов верхних звеньев флювиальной сети и элементарных склонов [Panin et al., 2001]

Типы	КДН
Водосборы верхних звеньев флювиальной сети	
С выпуклым продольным профилем	0,9
С вогнутым продольным профилем	0,5
Элементарные склоны	
Прямые	0,4
Рассеивающие	0,2
Концентрирующие	0,8

условий формирования талого и ливневого стока, проведения противозрозийных и водоохраных мероприятий (создания лесополос, малых водохранилищ и т. п.) не учтено. Также необходимо отметить, что в настоящий момент склоновый смыв является доминирующей бассейновой составляющей стока наносов в бассейне р. Плавы, поскольку другие процессы денудации (овражная эрозия, осыпи, оползни и т. д.) распространены крайне ограничено и даже на участках, где они присутствуют, благодаря их развитию происходит в основном местное перемещение материала, которое пренебрежимо мало с точки зрения рассмотрения общего баланса наносов в масштабах всего бассейна.

Если принять в качестве допущения, что весь бассейн в целом является зоной преобладания сноса, то возможно применение следующей формулы:

Таблица 4

Оценочные величины КДН ключевых водосборов третьего и четвертого порядков

Водосборы	КДН
Третьего порядка	
Малые (балка Ляпуновка) [Belyaev et al., 2012]	0,61
Средние (Западный сегмент водосбора Верхняя Локна) [Belyaev, 2012; Belyaev et al., 2013]	0,58
Крупные (Восточный сегмент водосбора Верхняя Локна) [Belyaev, 2012; Belyaev et al., 2013]	0,7
Четвертого порядка	
Часовенков Верх [Golosov et al., 2002]	0,11

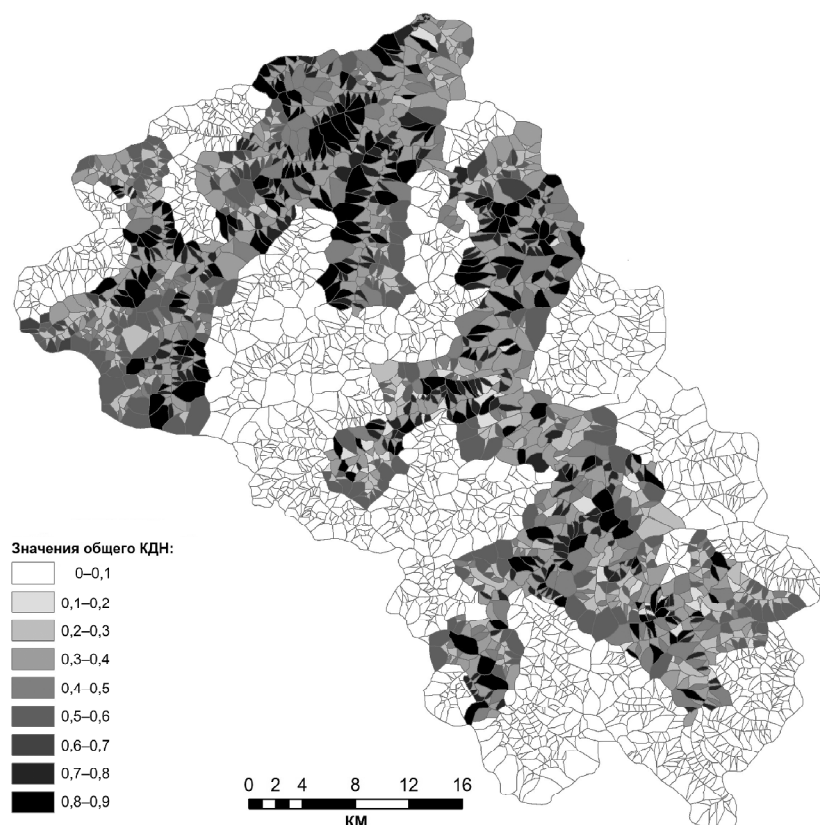


Рис. 5. Распределение величины КДН по выделенным элементам структуры бассейна р. Плавы согласно проведенным расчетам

Fig. 5. Scheme of calculated SDR values distribution for different types of headwater catchments and elementary slopes within the Plava River basin

дежностью получаемых по описанной методике результатов. Потребность перехода от изучения отдельных водосборов к классам приводит к тому, что уменьшается значимость индивидуального развития каждого из водосборов. При неадекватном выделении классов полученные результаты могут оказаться ошибочными. Также в подобной схеме фактически невозможно рассмотрение роли единичных крупных геоморфологических событий, которые кардинальным образом могут воздействовать на процесс перераспределения наносов. Вместе с тем, приведенные оценки включают в себя всю совокупность ошибок и неточностей использованных независимых методов.

Вторая группа проблем связана непосредственно с реализацией подобного рода исследований. Ввиду высокой трудоемкости проведенных операций по дешифрированию, анализу и сбору полевой информации, проведение столь детальных исследований для более крупных бассейнов представляется слабо реализуемым в условиях ограниченного количества ресурсов и времени. Выходом из данной ситуации может являться полуавтоматизированный анализ

структуры более крупных речных бассейнов методами ГИС-технологий и выделение контрольных участков, подобных бассейну р. Плавы. Это потребует проведения процедуры классификации на более детальной (не только чисто морфометрической) основе с привлечением таких показателей, как густота, плотность и глубина эрозионного расчленения, параметров буферных зон между нижними границами распаханых склонов междуречий и бровками долин, учета макро- и микроклиматических особенностей территории, ее геологического строения, истории развития, почвенного покрова и т. д.

Выводы:

- предложена общая схема количественной оценки пространственного распределения коэффициента доставки наносов в речном бассейне в условиях преобладания сельскохозяйственного землепользования и доминирующей роли эрозионно-аккумулятивных процессов в балансе вещества на основе выделения его структурных элементов по дихотомической системе кодирования порядков Философова–Стралера;

- обосновано сопоставление выделенных на основе морфометрического анализа типов элементов пространственной структуры исследованного бассейна р. Плавы с ключевыми участками – малыми водосборами, на которых выполнялись детальные полевые исследования комплексом независимых методов. Показана возможность синтеза результатов детальных полевых исследований с данными морфометрического анализа для экстраполяции значений коэффициентов доставки наносов на выделенное множество элементов структуры бассейна;

- полученные в рамках предлагаемого подхода количественные оценки показывают четкую обратную зависимость между величиной коэффициента доставки наносов с одной стороны и порядка или площади водосбора с другой. Показано, что основным источником поступления наносов в днища основных долин являются непосредственно впадающие в них водосборы первого-второго порядков, тогда как сухие долины более высоких порядков, напротив, выступают в основном в качестве временных накопителей переотложенного материала. Данные выводы хорошо согласуются с опубликованными результатами, полученными на основе детальных полевых исследований баланса наносов малых водосборов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00815 и 15-05-99449), программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-6545.2016.5) и по плану НИР научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 01201154409).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины / Под ред. Ю.А. Израэля М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Роскартография, 1998.
- Безухов Д.В., Беляев В.Р., Иванова Н.Н. Количественная оценка интенсивности и направленности эрозионно-аккумулятивных процессов на обрабатываемых склонах в пределах бассейна р. Плага (Тульская область) // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 16–23.
- Бобровицкая Н.Н. Эмпирический метод расчета смыва почвы со склонов // Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л., 1977. С. 202–211.
- Бондарев В.П., Беляев В.Р., Иванова Н.Н., Эвхард О. Доставка наносов с водосборных склонов в долину реки // Геоморфология. 2014. № 1. С. 36–45.
- Голосов В.Н. Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
- Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
- Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1984. 264 с.
- Кружалин В.И., Кадетов О.К., Симонов Ю.Г. Влияние структуры речной сети на ход рельефообразующих процессов // Геоморфология. 1981. № 3. С. 37–41.
- Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 199 с.
- Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: НКЦ «Академкнига», 2002. 256 с.
- Маккаев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне.: Изд-во Моск. ун-та, М.: 2003 (переиздание 1955 года). С. 6–7.
- Романцова Н.А., Парамонова Т.А., Матвеев Я.В., Семенихин А.И. Современные особенности накопления цезия-137 в различных фитоценозах Плавского радиоактивного пятна Тульской области // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Мат-лы Всероссийской научно-практической конференции 18–20 апреля 2012 г. Вып. 14. Москва. С. 206–214.
- Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки // Эрозия почв и русловые процессы. М., 2004. Вып. 14. С. 7–33.
- Скрипко В. В. Особенности структуры речных бассейнов равнинной части Алтайского края // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2012. № 3–2. 75 с.
- Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов, 1960. 93 с.
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Kislenko K.S., Kuznetsova J.S., Markelov M.V. Combining direct observations, modelling, and ¹³⁷Cs tracer for evaluating individual event contribution to long-term sediment budgets // Sediment dynamics in changing environments (Proceedings of a symposium held in Christchurch, New Zealand, December 2008). IAHS Publ. 2008. V. 325. P. 114–122.
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Ivanova N.N., Shamshurina E.N., Evrard O. Effects of land use and climate changes on small reservoir siltation in the agricultural belt of European Russia // Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management. V. 362 of IAHS Publ. IAHS Press Wallingford, 2013. P. 134–145.
- Belyaev V., Shamshurina E., Markelov M., Golosov V., Ivanova N., Bondarev V., Paramonova T., Evrard O., Otle C., Lefevre I., Bonte P. Quantification of the sediment budget of a river basin, based on reconstruction of the post-fallout redistribution of Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs // Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment (Proceedings of a symposium held at the Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS-Chengdu, China, 11–15 October 2012) (IAHS Publ. 356, 2012). P. 394–402.
- Golosov V., Ivanova N. Sediment-associated Chernobyl ¹³⁷Cs redistribution in small basins in central Russia // Applied Geomorphology. V. 10 of International association of geomorphologists. John Wiley & Sons Chichester, 2002. P. 165–182.
- Hinderer M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales // Sedimentary Geology. 2012. V. 280. P. 21–59.
- Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrological approach to quantitative morphology // Geological Society of America Bulletin. March 1945. V. 56. № 3. P. 275–370.
- 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. P. 185–204.
- Quine T. A. Use of a simple model to estimate rates of soil erosion from caesium-137 data // J. Water Resources. 1989. V. 8. P. 54–81.
- Robinson A.R. Relationship between soil erosion and sediment delivery // IAHS Publ. 1977. V. 122. P. 159–167.
- Roehl J.W. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors // International Association of Scientific Hydrology. 1962. V. 59. P. 202–213.
- Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // Geomorphology. 2012. V. 138. P. 74–88.
- Walling D.E. The sediment delivery problem // J. Hydrology. 1983. V. 65. P. 209–237.
- Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements // J. Environmental Quality. 1999. V. 28. P. 611–622.
- Wang Z., Govers G., Steegen A., Clymans W., Van den Putt A., Langhans C., Merckx R., Van Oost K. Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area // Geomorphology. 2010. V. 124. P. 65–74.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA, Handbook № 537. 1978. 58 p.

Поступила в редакцию 16.03.2016

Принята к публикации 09.02.2017

M.M. Ivanov¹, V.N. Golosov^{2,3}, V.R. Belyaev⁴ANALYSIS OF TOPOGRAPHY STRUCTURE FOR THE EVALUATION
OF SEDIMENT DELIVERY RATIO WITHIN
THE PLAVA RIVER BASIN (TULA OBLAST)

Erosion is the main agent of sediment redistribution within river basin. Its spatial pattern mostly depends on basin topography and structure of fluvial network. The contribution of relief to sediment redistribution within a river basin could be assessed through the detailed analysis of basin topography, classification of its elements and detailed field studies of key catchments corresponding to the identified classes. The most suitable quantitative parameter describing a river basin as a system of sediment redistribution is sediment delivery ratio (SDR). The SDR values were calculated for particular catchments within the Plava River network and for its basin as a whole. Considering the fact that the Plava River basin belongs to the Chernobyl-affected zone, the results can be useful for the assessment of radioecological danger and potential risks of river flow contamination.

Key words: fluvial processes, sediment budget, delivery ratio, small river basins, radioactive contamination, Srednerusskaya Upland.

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects № 16-05-00815 and 15-05-99449), the Russian Federation's President Program for support of the leading scientific schools (project NS-6545.2016.5) and under the scientific research plan of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes (№ 01201154409).

REFERENCES

- Atlas radioaktivnogo zagryazneniya evropejskoj chasti Rossii, Belorussii i Ukrainy [Atlas of Radioactive Contamination of the European Part of Russia, Belorussia and Ukraine] / Pod red. Ju.A. Izraelya. M.: IGKJe Rosgidrometa i RAN, Roskartografija, 1998 (in Russian).
- Belyaev V., Shamshurina E., Markelov M., Golosov V., Ivanova N., Bondarev V., Paramonova T., Evrard O., Otte C., Lefevre I., Bonte P. Quantification of the sediment budget of a river basin, based on reconstruction of the post-fallout redistribution of Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs // Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment (Proceedings of a symposium held at the Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS-Chengdu, China, 11–15 October 2012) (IAHS Publ. 356, 2012). P. 394–402.
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Kislenco K.S., Kuznetsova J.S., Markelov M.V. Combining direct observations, modelling, and ¹³⁷Cs tracer for evaluating individual event contribution to long-term sediment budgets // Sediment dynamics in changing environments (Proceedings of a symposium held in Christchurch, New Zealand, December 2008). IAHS Publ. 325, 2008. P. 114–122.
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Ivanova N.N., Shamshurina E. N., Evrard O. Effects of land use and climate changes on small reservoir siltation in the agricultural belt of European Russia // Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management. V. 362 of IAHS Publ. IAHS Press Wallingford, 2013. P. 134–145.
- Bezukhov D.V., Belyaev V.R., Ivanova N.N. Kolichestvennaya ocenka intensivnosti i napravlenosti erozionno-akkumulyativnyh processov na obrabatyvaemykh sklonakh v predelakh bassejna r. Plava (Tul'skaja oblast') [Quantitative evaluation of intensity and direction of erosion-accumulation processes on cultivated slopes within the Plava River basin (Tula Oblast)] // Vestnik MGU. Ser. 5. Geografija. 2014. № 6. S. 16–23 (in Russian).
- Bobrovickaja N.N. Empiricheskij metod raschyota smyva pochvy so sklonov [Empirical method of slope erosion calculation] // Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie. L., 1977. P. 202–211 (in Russian).
- Bondarev V.P., Belyaev V.R., Ivanova N.N., Evrard O. Dostavka nanosov s vodosbornykh sklonov v dolinu reki [Sediment delivery from water catchment's slopes to river valley] // Geomorfologiya. 2014. № 1. S. 36–45 (in Russian).
- Dedkov A.P., Mozherin V.I. Eroziya i stok nanosov na Zemle [Erosion and sediment yield on the Earth]. Kazan': Izd-vo Kazansk. Un-ta, 1984. 264 p. (in Russian).
- Filosofov V.P. Kratkoe rukovodstvo po morfometricheskomu metodu poiskov tektonicheskikh struktur [Quick guide for the morphometric method of identifying the tectonic structures]. Saratov, 1960. 93 p. (in Russian).
- Golosov V.N. Ispol'zovanie radioizotopov pri issledovanii erozionno-akkumulyativnyh processov [Application of radioisotopes for investigation of erosion processes] // Geomorfologiya. 2000. № 2. P. 26–33 (in Russian).
- Golosov V., Ivanova N. Sediment-associated Chernobyl ¹³⁷Cs redistribution in small basins in central Russia // Applied Geomorphology. V. 10 of International association of geomorphologists. John Wiley & Sons Chichester, 2002. P. 165–182.
- Golosov V.N. Erozionno-akkumulyativnye processy v rechnykh bassejnah osvoennyykh ravnin. M.: GEOS, 2006. 296 s. (in Russian).
- Hinderer M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales // Sedimentary Geology. 2012. V. 280. P. 21–59.
- Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrological approach to quantitative morphology // Geological Society of America Bulletin. March 1945. V. 56, no. 3. P. 275–370.
- Kruzhalin V.I., Kadetov O.K., Simonov Ju.G. Vliyanie struktury rechnoj seti na khod rel'efoobrazuyuschikh processov [Influence of

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher; e-mail: ivanovm@bk.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: golosov@gmail.com

³ Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environment, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vladimir.belyaev@gmail.com

river network's structure on geomorphologic processes] // *Geomorfologiya*. 1981. № 3. P. 37–41 (in Russian).

Larionov G.A. Erozija i deflyaciya pochv [Water and wind erosion of soils]. Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, M., 1993. 199 p. (in Russian).

Litvin L.F. Geografiya erozii pochv sel'skohozyajstvennykh zemel' Rossii [The geography of soil erosion in Russia]. M.: NKC «Akademkniga», 2002. 256 p. (in Russian).

Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v eyo bassejne [River channel and erosion in the river basin]. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2003 (pereizdanie 1955 goda). P. 6–7 (in Russian).

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. P. 185–204.

Quine T.A. Use of a simple model to estimate rates of soil erosion from caesium-137 data // *J. Water Resources*. 1989. V. 8. P. 54–81.

Robinson A.R. Relationship between soil erosion and sediment delivery // *IAHS Publ.* 1977. V. 122. P. 159–167.

Roehl J.W. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors // *International Association of Scientific Hydrology*. 1962. V. 59. P. 202–213.

Romancova N.A., Paramonova T.A., Matveev Ja.V., Semenikhin A.I. Sovremennye osobennosti nakopleniya ceziya-137 v razlichnykh fitocenozach Plavskogo radioaktivnogo pyatna Tul'skoj oblasti. [Modern features of Cs-137 accumulation in different phytocenoses of the Plavsk Hot Spot in the Tula Oblast] // *Aktual'nye*

problemy ekologii i prirodopol'zovaniya. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii 18–20 aprelya 2012 g., Vypusk 14, g. Moskva). P. 206–214 (in Russian).

Simonov Ju.G., Simonova T.Ju. Rechnoj bassejn i bassejnovaya organizaciya geograficheskoy obolochki [Rivers basin and the basin organization of the geosphere] // *Erozija pochv i ruslovyje processy*. M., 2004. V. 14. P. 7–33 (in Russian).

Skipko V.V. Osobennosti struktury rechnykh bassejnov ravninnoj chasti Altajskogo kraja [Specific features of river basin structure within the plains of the Altai Kraj] // *Izv. Altajskogo gos. un-ta*. 2012. №. 3–2. P. 75 (In Russian).

Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // *Geomorphology*. 2012. V. 138. P. 74–88.

Walling D.E. The sediment delivery problem // *J. Hydrology*. 1983. V. 65. P. 209–237.

Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements // *J. Environmental Quality*. 1999. V. 28. P. 611–622.

Wang Z., Govers G., Steegen A., Clymans W., Van den Putte A., Langhans C., Merckx R., Van Oost K. Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area // *Geomorphology*. 2010. V. 124. P. 65–74.

Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA, Handbook № 537, 1978. 58 p.

Received 16.03.2016

Accepted 09.02.2017