

22. Государственный водный кадастр: основные гидрологические характеристики. Л.: Гидрометеиздат, 1980. Т. 15. 248 с.
23. Государственный водный кадастр: основные гидрологические характеристики. Л.: Гидрометеиздат, 1979. Т. 15. 488 с.
24. Государственный водный кадастр: ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Архангельск: Госкомитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, 1984. Т. 1. 542 с.
25. *Yermolaev O.P.* Assessment of the Suspended Sediment Yield in the Rivers' Basin of the Russian Plain // *World Applied Sci. Journ.* 2013. № 27 (5). P. 626–631.
26. *Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mozherin V.V., Mozherin V.I.* Global geoinformation system "Suspended sediment yield in the river basins of the Earth" // *Gomorphology*. 2012. № 2. P. 50–58.
27. *Maltsev K., Yermolaev O., Mozherin V.* Mapping and spatial analysis of suspended sediment yields from the Russian Plain // *IAHS-AISH Publication*. 2012. V. 356. P. 251–258.
28. *Yermolaev O., Avvakumova A.* Cartographic-geoinformational estimation of spatiotemporal erosion dynamics of arable soils in forest-steppe landscapes of the Russian Plan // *IAHS-AISH Publication*. 2012. V. 356. P. 332–337.

Казанский федеральный университет

Поступила в редакцию
21.02.2012

USING DEMS FOR AUTOMATIC PLOTTING OF CATCHMENTS

K.A. MAL'TSEV, O.P. YERMOLAYEV

Summary

The authors suggest the method for digital elevation models (DEMs) compiling aimed to plotting the boundaries of the drainage catchments for the lowland relief (West Siberia as an example). The proposed method allows to take into account the local contemporary depressions – traps of the suspended sediment yield and surface runoff. In the result the higher precision of the basins boundaries pattern is obtained. In this method additional information from the topographic maps is used. The DEM compiled with the use of the suggested method helps to significantly increase the accuracy of the West Siberian catchments' automatic plotting.

УДК 551.4.012→551.435.04

© 2014 г. Х.Н. САФАРОВ, М.В. МАРКЕЛОВ, В.Н. ГОЛОСОВ, Б. ВОЛЬФГРАММ

ОЦЕНКА ТЕМПОВ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОСОВ НА СКЛОНАХ МАЛОГО ВОДОСБОРА ЛЁССОВОГО ПОЯСА ТАДЖИКИСТАНА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЦЕЗИЕВОГО МЕТОДА¹

Постановка проблемы

Особенностью развития эрозионных процессов в горах является существенная зависимость от состава почвообразующих пород, повторяемости стокоформирующих событий, особенностей температурного режима в сочетании с изменениями влажности грунта и специфики освоения склоновых земель. Так, например, многовековая история сельскохозяйственного освоения гор Средиземноморья привела к значительной деградации земель, что способствовало образованию обширных массивов бедлендов [1–3]. Современные темпы эрозионных процессов в этом регионе, выявленные на основе использования различных методов, также достигают значительных величин [4–5], но

¹ Работа выполнена в рамках деятельности Швейцарского национального исследовательского центра (NCCR) Север-Юг "Партнерство для смягчения последствий климатических изменений" при поддержке Швейцарского агентства для развития и сотрудничества и институтов-участников программы.

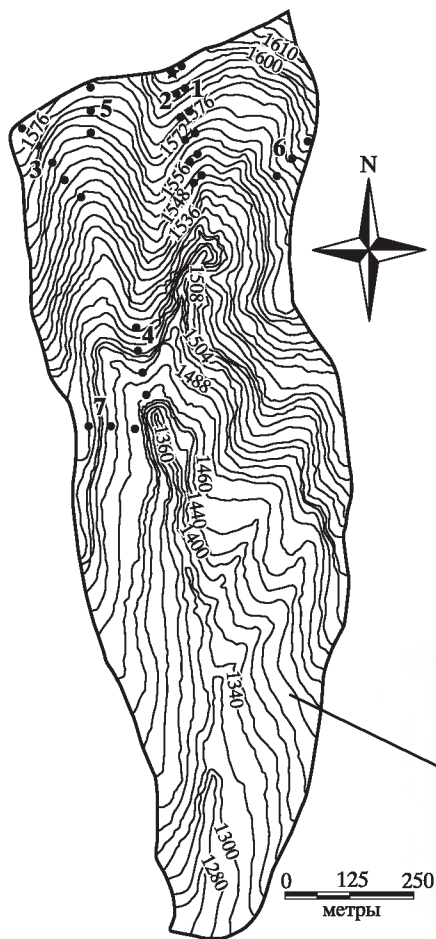


Рис. 1. Карта рельефа водосбора Бодомо с указанием расположения точек отбора проб и опорной площадки



основной вклад в суммарную денудацию вносят экстремальные события, связанные с выпадением осадков высокой интенсивности.

Основная задача данного исследования состоит в оценке темпов перераспределения наносов в пределах различных сельскохозяйственных угодий малого водосбора Бодомо, расположенного примерно в 40 км к востоку от Душанбе (Республика Таджикистан), с использованием радиоцезиевого метода.

Лёссовый пояс Таджикистана расположен в предгорьях и низкогорьях центральной части республики и является одним из важнейших сельскохозяйственных регионов страны в связи с достаточно большой площадью пахотно-пригодных земель и обширных пастбищ, находящихся на незначительном удалении от населенных пунктов. Он вытянут с СЗ на ЮВ вдоль Гиссарского хребта, расширяясь в пределах Южно-Таджикской депрессии и далее по направлению к долинам рек Амударья и Пянджа (рис. 1). Гиссарская долина представляет собой тектоническую межгорную впадину, разделяющую область виргации позднепалеозойских складок Южного Тянь-Шаня и более южную область виргации складок альпийского возраста [6]. Южно-Таджикская депрессия протягивается на 70 км в широтном направлении, с севера ее обрамляет Гиссарский хребет, а с юга – сливающиеся между собой северные окончания горных гряд юга Таджикистана. Наибольшей ширины (около 20 км) депрессия достигает в центральной части – примерно на долготе г. Душанбе, здесь ее высотные отметки составляют около 720 м над у. м. В тектоническом отношении Южно-Таджикская

депрессия представляет собой синклиналичную мульду, осложненную вдоль бортов разрывами. Главной рекой депрессии является Кафарниган, в который с юга впадает только один маловодный летом водоток – р. Иляк, в бассейне которого и расположен водосбор Бодомо (рис. 1).

Плотность населения в этом районе, в т. ч. в сельской местности, неуклонно возрастает. До начала 2000-х гг. это вело к увеличению площади пахотных земель, которые распространялись на относительно крутые предгорные склоны. Затем (и вплоть до настоящего времени) пахотные земли на крутых склонах оказались в основном заброшены, т. к. значительная часть мужского населения работает преимущественно в России. Но поскольку никаких восстановительных мероприятий на пахотных землях, расположенных на крутых предгорных склонах, проведено не было, их проективное покрытие травянистой растительностью остается низким, что способствует развитию эрозии. Одновременно за счет роста поголовья домашних животных существенно возрастает нагрузка и на пастбища, что в целом ведет к ускоренной деградации земель в предгорьях [7, 8].

Достаточно контрастный рельеф исследуемой территории и высокая размываемость лёссов даже в естественных, ненарушенных деятельностью человека условиях способствуют развитию овражной эрозии и обвально-осыпных процессов по бортам врезов. Многие крупные овраги уже прорезали всю толщу лёссовых отложений и достигли трудно размываемых кристаллических пород. Рост коэффициентов поверхностного склонового стока в связи с деградацией естественного травянистого покрова и переуплотнением верхних горизонтов почвы при увеличении антропогенной нагрузки способствует интенсификации линейной эрозии, темпы которой могут быть оценены на основе сопоставления аэро- и фотоснимков за разные годы [9]. Более детальные оценки внутригодовых темпов углубления и вершинного прироста овражных форм могут быть выполнены как на основе традиционных методов реперов и шпилек [10], так и путем проведения повторных съемок при наземном лазерном сканировании [11–13]. Использование данного набора приемов в сочетании с методом ловушек [14] позволяет судить и о темпах обвально-осыпных процессов на бортах активных оврагов и подмываемых берегов временных и постоянных водотоков.

Оценка темпов плоскостного и мелкоручейкового смыва на пахотных и пастбищных склонах в среднемноголетнем разрезе вызывает наибольшие затруднения, так как их последствия не столь ясно отражаются в рельефе, как формы линейной эрозии. Некоторые представления о среднегодовых темпах смыва с участков, занятых различными культурами, дают результаты наблюдений на стоковых площадках Института почвоведения Академии сельскохозяйственных наук Республики Таджикистан. Однако они характеризуют темпы смыва со склонов фиксированной длины и площади. Также темпы смыва могут быть определены при помощи расчетных эрозионных моделей [15], как, в частности, уже сделано для пахотных земель лёссового пояса [16]. Однако результаты расчетов по эрозионным моделям должны быть верифицированы для исследуемой территории на основе данных полевых оценок темпов смыва независимыми методами. В этой связи применение радиоцезиевого метода является одной из возможностей количественной оценки среднегодовых темпов перераспределения наносов на обрабатываемых и пастбищных склонах за достаточно продолжительный временной интервал.

Оценка темпов перераспределения наносов на основе использования изотопа ^{137}Cs в качестве маркера базируется на его свойстве перемещаться совместно с наносами. Основная часть ^{137}Cs , имеющего антропогенное происхождение, появилась с началом проведения ядерных взрывов в открытой атмосфере с 1954 г. Испытания продолжались до 1963 г., когда был подписан договор о запрещении их проведения в открытой атмосфере. Из атмосферы изотоп ^{137}Cs вымывался дождями и при поступлении на поверхность почвы быстро фиксировался на ней и в дальнейшем перемещался только с почвенными частицами. Выпадения изотопа ^{137}Cs из атмосферы в связи с проведением

ядерных испытаний, продолжавшихся с 1954 г. и до начала 1980-х гг., получили название глобальных в отличие от локальных выпадений, связанных с авариями на ядерных объектах, из числа которых наиболее известны аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима в Японии.

Для использования ^{137}Cs в качестве маркера в районе исследований необходимо, во-первых, определить его начальное выпадение на опорном геоморфологически стабильном участке (т. е. там, где с момента начала выпадения изотопа не наблюдались ни снос почвы, ни отложение наносов) за период с 1954 г. до момента отбора пробы. Для зон смыва и аккумуляции проводится отбор проб с последующим определением содержания в них изотопа ^{137}Cs . Большее относительно опорного участка содержание изотопа в пробе свидетельствует об аккумуляции материала в точке отбора, и, напротив, меньшее его содержание указывает на эрозию. Для пересчета содержания изотопа ^{137}Cs в темпы смыва/намыва используются модели, различающиеся по количеству входящих в них параметров [17]. Результаты использования радиоизотопного метода для оценок темпов перераспределения наносов на склонах в целом ряде регионов мира позволили получить достаточно достоверные результаты [18–23]. Радиоцезиевый метод широко использовался и для оценки перераспределения наносов на малых водосборах в горах [24–26]. В районах с высокой начальной вариабельностью выпадения изотопа ^{137}Cs ($\text{CV} > 20\%$) или с высокой повторяемостью выпадения интенсивных ливневых осадков [27] использование данного метода для количественной оценки темпов перераспределения наносов по существу невозможно. До настоящего времени для территории лёссового пояса Таджикистана радиоцезиевый метод не использовался.

Объект исследования

Водосбор Бодомо площадью 0.77 км^2 имеет близкую к грушевидной конфигурацию с перепадами высот 357 м. Он расположен в бассейне р. Иляк в предгорной части Каратегинского хребта. Почвы водосбора коричневые карбонатные, сформированные на лёссах мощностью от 10 до 30 м, подстилаемых гранодиоритами. Среднее содержание гумуса в почве 1–2%. Среднегодовое количество осадков составляет здесь 800–900 мм, большая их часть выпадает в период с ноября по апрель с максимумом в марте. В зимние месяцы часть осадков выпадает в виде снега, периоды таяния которого с внутрисуточными переходами температуры воздуха через 0°C стимулируют развитие осыпных процессов на крутых оголенных бортах линейных врезов, сложенных лёссами [14].

В 1930-е гг. XX в. почти половина территории водосбора Бодомо использовалась для богарных посевов зерновых культур. Распашка продолжалось до 1943 г. На залежных землях восстановилась естественная растительность, и далее, вплоть до конца 1980-х гг., водосбор в основном использовался в качестве пастбища. В конце 1980-х гг. часть земель водосбора Бодомо была арендована. 30 семей села Сангбур получили земельные участки размером от 0.5 до 2.3 га, всего 28.2 га, или 34% от общей площади водосбора. В основном это участки относительно более пологих склонов (уклон $\leq 10^\circ$), которые были при необходимости террасированы и стали использоваться под плодовые сады, для посева многолетних кормовых трав и зерновых культур. Оставшаяся часть территории водосбора Бодомо продолжала использоваться для выпаса скота жителями села Сангбур.

Центральная часть водосбора прорезана временным водотоком вплоть до выходов коренных кристаллических пород. Борты этого ручья преимущественно крутые, иногда отвесные. Большая часть развивающихся по ним овражных врезов располагается по левому склону долины водотока. Протяженность оврагов достигает первых десятков метров, их вершины преимущественно трапецевидной формы в плане, стенки отвесные. В пределах водосборов бортовых оврагов развиты различные по величине склоновые овраги, занимающие преимущественно естественные понижения в рельефе и собирающие сток со склонов. Профили днищ склоновых оврагов отражают эта-

Морфометрические характеристики склонов, на которых проводился отбор проб на содержание изотопа ^{137}Cs по трансектам

№ трансекта	Угодье	Длина склона, м	Средний уклон, град.	Форма склона
1	Пастбище	290	2–36	Выпуклый собирающий
2	«	290	2–36	«
3	«	220	2–27	«
4	Пашня без полива (богара)	190	10–15	Выпуклый рассеивающий
5	Поливная пашня	220	3–10	Относительно прямой
6	Плодовый сад на террасированном склоне	120	6–8	Слабовыпуклый рассеивающий
7	Многолетние травы (посев)	165	1–31	Выпуклый собирающий

пы их формирования: отступающие уступы чередуются с зонами преимущественной аккумуляции наносов. Единичные бортовые овраги, развивающиеся по правобережью долины ручья, имеют гораздо меньшие по площади бассейны в связи с большими уклонами склонов междуречий в этой части водосбора Бодома, а склоновые овраги здесь вообще отсутствуют.

На склонах междуречий имеются несколько сильно деградированных участков, по существу представляющих собой мини-бедленды с полностью смытым плодородным слоем, расчлененные сетью борозд и промоин. Данные участки приурочены к местам регулярного скотопргона в приводораздельных частях водосбора. Можно предположить, что бедленды являются основными поставщиками наносов, формирующихся на водосборе и поступающих в днище долины ручья в период активизации склонового стока. Другими важными источниками наносов являются продукты размыва вершин склоновых и бортовых оврагов, а также днищ последних и материал, осыпавшийся с отвесных бортов. Идентификация и количественная оценка интенсивности развития данных экзогенных процессов может быть проведена с использованием широкого набора традиционных и современных методов исследования.

Гораздо сложнее количественно определить темпы развития плоскостного и мелко-ручейкового смыва с участков водосбора, занятых пашней, садами и пастбищами с сохранившимся, но в разной степени деградированным почвенным покровом. Использование радиоцезиевого метода для количественной оценки перераспределения наносов на склонах водосбора, занятых различными сельскохозяйственными угодьями, позволяет определить среднемноголетние темпы сноса почвы с данных участков.

Морфометрические характеристики склонов, на которых проводился отбор проб для определения содержания в почве изотопа ^{137}Cs , приведены в таблице 1. Большинство склонов имеет выпуклую форму с нарастанием уклона по его длине. По сохранности растительного покрова склоны пастбищ могут быть разделены на четыре группы, а именно: хорошо сохранившиеся (проективное покрытие (ПП) 90–100%), слабо выбитые (ПП 80–90%), умеренно (ПП 50–80%) и сильно выбитые пастбища (ПП <50%). Отбор проб на последних не проводился, так как на них темпы эрозии очень высоки в связи с формированием сети промоин и борозд, темпы врезания которых могут быть помимо всего прочего определены другими методами.

Методика исследований

Для определения суммарного выпадения изотопа ^{137}Cs из атмосферы на водосборе Бодома был выбран близкий к горизонтальному приводораздельный участок склона. Здесь с площади 20×20 см из разреза до глубины 45 см послойно (через 3 см) были отобраны образцы для определения вертикального распределения изотопа ^{137}Cs . На

остальной части водосбора послойные образцы отбирались цилиндрическим пробоотборником с внутренним диаметром 50 мм по 7 трансектам (рис. 1), заложенным вдоль по склону на различных угодьях, с пятикратной повторностью в каждой точке отбора. Затем образцы, отобранные с каждой из глубин, смешивались в один образец для определения характерного для каждой глубины содержания изотопа ^{137}Cs . Послойные образцы брались с шагом в 5 см до глубины 35 см, а последний образец отбирался с глубины 35–42 см. Послойные образцы брались также в днищах крупных линейных врезов и в пределах аккумулятивных участков с целью определения темпов накопления, а также для оценки долевого вклада различных источников наносов в суммарный сток таковых, транспортируемых временными водотоками в период формирования поверхностного стока. Оценка долевого вклада проводилась исходя из соотношения концентрации изотопа ^{137}Cs в верхних эродлируемых горизонтах почвы на нераспахиваемых склонах, на пашне и в бортах линейных врезов со средней концентрацией изотопа в отложениях в днище основного водотока водосбора Бодома. Всего послойные образцы были отобраны в 28 точках водосбора, в результате чего было подготовлено для проведения аналитических работ 224 образца. Положение каждой точки отбора было зафиксировано с помощью GPS.

Подготовка и анализ проб на содержание ^{137}Cs проводились в Институте почвоведения АСХН Республики Таджикистан. Подготовка проб для проведения гамма-спектрометрического анализа включала сушку при температуре 105°C и измельчение образца до фракции <0.75 мм. Анализ проводился на гамма-спектрометрическом комплексе производства фирмы ORTEC с полупроводниковым коаксиальным детектором высокого разрешения из особо чистого германия с эффективностью 40% (модель GEM-M5970P4-S). Время экспозиции определялось статистически достоверным фиксированием фотопика ^{137}Cs на линии 661.66 кэВ и изменялось от 10 000 до 60 000 сек. Обработка полученных спектров и расчет активности проводились в программе Gamma Vision-32.

Для пересчета содержания в почве изотопа ^{137}Cs в темпы перераспределения наносов на склонах, занятых пастбищами, использовалась модель вертикального распределения ^{137}Cs для ненарушенного почвенного профиля [17], в которой подразумевается, что выпадение радионуклида из атмосферы было одномоментным событием, после которого в почве установилось характерное экспоненциальное распределение его по глубине. Дальнейшая трансформация этого распределения обусловлена только удалением верхней части почвы в результате плоскостного смыва.

На территориях с преимущественно глобальными выпадениями изотопа ^{137}Cs за момент однократного поступления радионуклида на поверхность почвы принимается год максимальных его выпадений (1963).

На участках с доминированием эрозии расчет проводился по формуле:

$$R = 10 \times \frac{H_0}{\Delta t} \times \ln \frac{A_{ref}}{A}, \quad (1)$$

где R – интенсивность эрозии (т/га в год), Δt – время, прошедшее с 1963 г. до момента отбора проб (годы), H_0 – параметр, характеризующий степень проникновения радионуклида в глубь почвы [28] ($\text{кг}/\text{м}^2$), A – запас радионуклида в точке ($\text{Бк}/\text{м}^2$), A_{ref} – опорное значение запаса ^{137}Cs ($\text{Бк}/\text{м}^2$), 10 – коэффициент перевода размерности из $\text{кг}/\text{м}^2$ в т/га.

Параметр H_0 определялся по глубинному распределению радионуклида в послойном разрезе на опорном участке путем его аппроксимации по формуле:

$$C(x) = C_0 \times e^{-x/H_0}, \quad (2)$$

где $C(x)$ – удельная активность ^{137}Cs на глубине, соответствующей кумулятивной удельной массе x ($\text{Бк}/\text{кг}$), C_0 – удельная активность ^{137}Cs на поверхности ($\text{Бк}/\text{кг}$), x –

кумулятивная удельная масса (масса столба почвы от поверхности до определенной глубины, отнесенная к площади основания этого столба) (кг/м²).

На участках аккумуляции превышение запаса над опорным значением обусловлено поступлением радионуклида с наносами, перемещенными с вышерасположенных участков, подвергшихся эрозии. Таким образом, интенсивность накопления материала можно рассчитать, моделируя удельную активность ¹³⁷Cs в аккумулятивном осадке, которую можно определить как отношение суммарных потерь запаса радионуклида на вышерасположенном эродированном участке склона к суммарным потерям почвы на этом же участке. Следовательно, интенсивность аккумуляции R_a (т/га в год) может быть рассчитана по формуле:

$$R_a = \frac{A_a - A_{ref}}{\frac{\int_S (A_{ref} - A_i) dS}{\int_S R_i dS}}, \quad (3)$$

где A_a – запас ¹³⁷Cs в аккумулятивной точке (Бк/м²), A_{ref} – опорное значение запаса ¹³⁷Cs (Бк/м²), A_i – запасы ¹³⁷Cs в точках отбора проб на эродированном участке (Бк/м²), R_i – интенсивность эрозии в точках отбора проб на эродированном участке (т/га в год), S – площадь эродированного участка (м²).

Пропорциональная модель применялась для пересчета содержания изотопа ¹³⁷Cs в почве в темпы эрозии и аккумуляции на распахиваемых участках. Модель основана на предположении, что весь запас радионуклида ¹³⁷Cs равномерно распределен по всему пахотному горизонту. Формулу расчета интенсивности смыва почвы или накопления наносов можно представить в виде:

$$R = 10 \times \frac{BZ_p}{\Delta t} \times \left(\frac{A - A_{ref}}{A_{ref}} \right), \quad (4)$$

где R – интенсивность эрозии/аккумуляции (отрицательное значение соответствует эрозии, положительное – аккумуляции (т/га в год)), Z_p – мощность пахотного горизонта (м), B – плотность почвы (кг/м³), Δt – продолжительность периода оценки интенсивности эрозии или аккумуляции (годы), A – запас радионуклида в точке (Бк/м²), A_{ref} – опорное значение запаса радионуклида (Бк/м²), 10 – коэффициент перевода размерности из кг/м² в т/га.

Продолжительность периода оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов выбиралась с учетом соотношения продолжительности цезиевого периода

Таблица 2

Количественная оценка темпов перераспределения наносов на различных угодьях радиоцезиевым методом (отрицательные значения – эрозия, положительные значения – аккумуляция), т/га в год

Трансект	Землепользование	Диапазон изменения	Среднее значение
1	Пастбище в хорошем состоянии	–3.1 – –5.0	–4.0
2	« слабо выбитое	4.3 – –19	–6.0
3	« умеренно выбитое	–2.9 – –23.2	–11.6
4	Поливная пашня	–32.0 – –107.0	–59.6
5	Пашня	–40.6 – –66.9	–53.7
6	Сеяный луг	–39.3 – –151.3	–95.1
7	Плодовый сад на искусственных террасах	–15 – –119	–67.2

(времени, прошедшего с максимума глобальных выпадений изотопа ^{137}Cs , т.е. с 1963 г., до момента отбора пробы) и периода распахки. В нашем случае изучаемые склоны стали распахиваться только в конце 1980-х гг., поэтому период оценки принимался равным 17 годам (с 1989 г. до момента отбора проб в 2006 г.). При этом допускалось, что интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов в условиях использования этих склонов до 1989 г. под пастбища была незначительна и существенно не влияла

на изменение запасов радионуклида. Такое предположение отчасти подтверждается нашими оценками темпов смыва, полученными для склонов, занятых пастбищем и в настоящий момент (табл. 2). Тем не менее, такое предположение приводит к некоторому завышению результатов расчета по пропорциональной модели, достоверно оценить которое невозможно ввиду отсутствия данных о темпах процессов в каждой конкретной точке опробования в период, предшествовавший распахке.

Результаты и их анализ

Эпюра вертикального распределения изотопа ^{137}Cs на опорном участке полностью повторяет вертикальное распределение цезия на ненарушенных (опорных) участках в других регионах мира (рис. 2А): максимум содержания изотопа находится в верхних 6 см, а более 90% изотопа располагается в верхних 12 см [29]. Аналогичное распределение и практически сходные суммарные выпадения изотопа ^{137}Cs из атмосферы выявлены и на ненарушенном участке в плодовом саду (рис. 2Б), а также в еще одном разрезе, расположенном на относительно плоском водоразделе в верхней части водосбора, где суммарные запасы изотопа ^{137}Cs составили 4020 Бк/м². Таким образом, можно говорить об относительно равномерном начальном выпадении изотопа ^{137}Cs

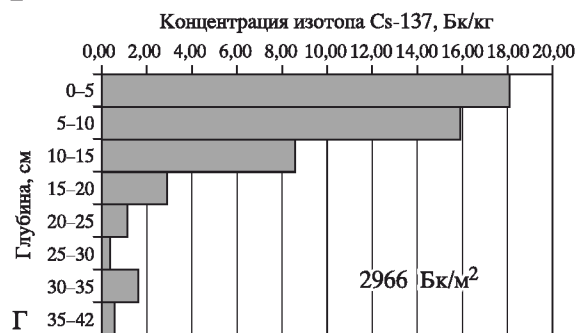
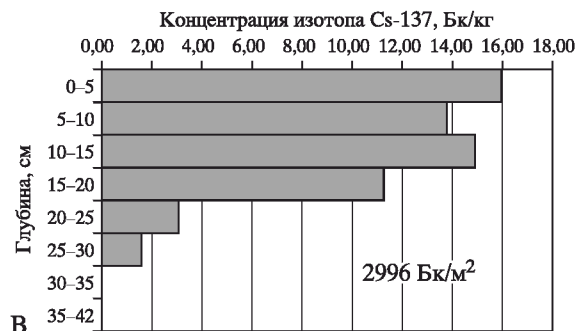
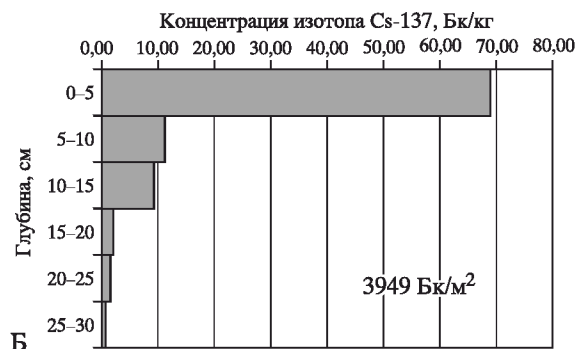
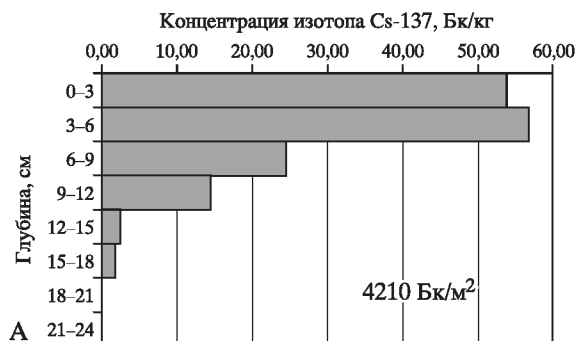


Рис. 2. Вертикальное распределение и суммарные запасы изотопа ^{137}Cs в разрезах: А – на опорном участке – пастбище, Б – на ненарушенном участке в плодовом саду, В – на орошаемой пашне, Г – на деградированном пастбище

Рис. 3. Эпюры вертикального распределения и суммарные запасы изотопа ^{137}Cs в разрезах на участках аккумуляции, расположенных в днищах линейных врезов водосбора Бодомо

на водосборе Бодомо, что позволяет использовать радиоцезиевый метод для оценки степени деградации почв на различных сельскохозяйственных угодьях.

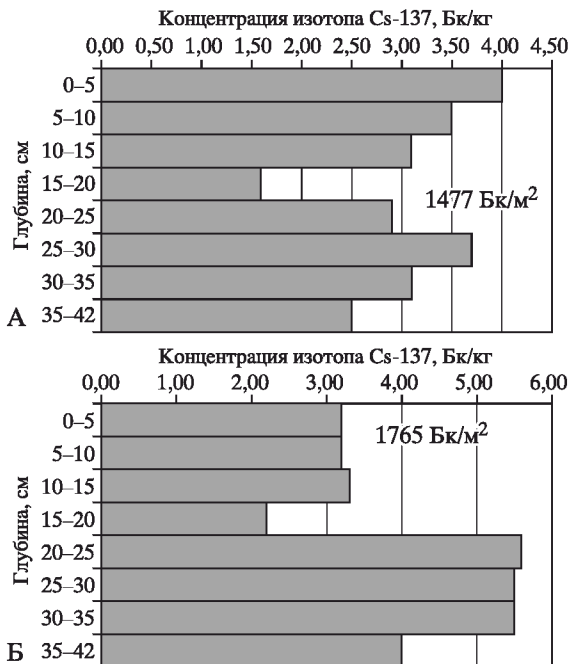
Эпюра вертикального распределения изотопа на пахотном участке (рис. 2В) подтверждает регулярное перемешивание верхнего 20-сантиметрового слоя, что соответствует глубине вспашки на данном участке. В то же время суммарный запас изотопа ^{137}Cs здесь существенно ниже, чем на опорном участке, что указывает на потери почвы за счет водной и механической эрозии даже на верхнем участке пахотного склона. Аналогичные эпюры вертикального распределения получены для точек отбора на других склонах, где велась распашка.

Содержание изотопа ^{137}Cs на верхнем участке склона, занятом сильно деградированным пастбищем, гораздо ниже по сравнению с его содержанием на опорном участке (рис. 2Г). Обращает на себя внимание, что, по сравнению с опорным участком здесь несколько большая глубина проникновения изотопа ^{137}Cs . Это, вероятно, связано с вымыванием почвенных частиц по трещинам из верхних горизонтов в нижние. Подобные явления весьма типичны в периоды летних засух для склонов, сложенных лёссами.

Аналогичные эпюры вертикального распределения характерны и для других точек отбора, расположенных на пастбищах, что указывает на отсутствие распашки данных склонов, как минимум, с начала 1960-х гг. Единственным исключением является верхняя точка на трансекте 3, где содержание изотопа ^{137}Cs сравнительно постоянно в 4-х верхних горизонтах (до глубины 20 см), что позволяет утверждать, что ранее данный участок перепашивался.

Вертикальное распределение изотопа ^{137}Cs в зонах аккумуляции, расположенных в днищах крупных линейных врезов, характеризуется отсутствием каких-либо пиков и общим существенно более низким содержанием изотопа (рис. 3). Это свидетельствует о том, что по существу аккумуляция наносов в днище носит временный характер и в момент формирования сильных паводков все ранее отложившиеся там наносы выносятся за пределы водосбора Бодомо. Затем, при более слабом стоке происходит частичная разгрузка потока и новое отложение наносов в днище. Такие циклы могли повторяться неоднократно за период с середины прошлого века. Данные количественных оценок темпов смыва с различных угодий, полученные на основе расчетов по моделям, представлены в табл. 2.

Можно говорить о существенном росте темпов перераспределения наносов на пашне по сравнению с пастбищем. Во-первых, это связано с вкладом механической эрозии при обработке почвы, а во-вторых, с увеличением роли капельной эрозии в суммарном смыве. Фактор механического перемещения почвы при обработке в



**Среднегодовые темпы смыва с различных угодий (результаты наблюдений 2005 г.,
размер площадки 200 м², длина 25 м)**

Культура	Стокоформирующие осадки, мм	Коэффициент стока	Темпы смыва, т/га
Пар	216.7	0.34	8.8
Озимая пшеница	216.7	0.3	8.2
Эспарцет	216.7	0.27	6.1
Люцерна, второй год	216.7	0.21	4.8

наибольшей степени сказался на сеянном лугу (трансект 6), так как там пахотные участки имеют максимальные уклоны (табл. 1). Естественно, значительное перемещение почвы произошло и в плодовом саду, где были созданы искусственные террасы для посадки деревьев. В данном случае основной прирост в темпах перераспределения наносов связан именно с механическим перемещением почвы. На двух трансектах, расположенных на пашне (№№ 4 и 5) с относительно небольшими для предгорий уклонами (табл. 1), темпы перераспределения наносов сопоставимы (табл. 2). Но на поливной пашне они все же выше за счет дополнительного вклада ирригационной эрозии. При контролируемом выпасе даже на крутых склонах среднегодовой смыв почвы с пастбищ сравнительно небольшой.

Полученные радиоцезиевым методом величины смыва на пашне существенно превышают темпы смыва, выявленные при проведении наблюдений на стоковых площадках Института почвоведения АСХН Республики Таджикистан, расположенных в пяти км к востоку от водосбора Бодомо (табл. 3). Это связано, на наш взгляд, с рядом причин. Во-первых, наблюдения на стоковых площадках характеризуют смыв за один конкретный год, тогда как цезиевый метод позволяет определить среднемноголетний смыв почвы за весь период распашки этих склонов (1989–2006 гг.). Весьма вероятно, что основной вклад в деградацию земель вносят экстремальные ливни, которые приводят к значительным потерям почвы. Однако судя по коэффициенту стока воды, таковые не отмечены в 2005 г., когда проводились наблюдения на упомянутых стоковых площадках. Во-вторых, следует учитывать, что при помощи цезиевого метода оцениваются среднемноголетние темпы перераспределения наносов, а в случае пахотных склонов – и вклад механической эрозии, то есть перемещение почвы вниз по склону орудиями вспашки, темпы которого в условиях предгорий составляют 8–18 т/га в год [30]. Наконец, при расчетах принималось допущение, что до момента начала распашки никакого смыва не происходило, что, очевидно, не соответствует действительности, исходя из оценок смыва на пастбищных склонах в пределах водосбора Бодомо (табл. 2). Тем не менее, основной вклад в усиление темпов смыва на пашне вносит ливневой сток, который, как минимум, в 3–4 раза превышает смыв почвы с пастбищных склонов.

Сопоставление содержания изотопа ¹³⁷Cs в почвах различных угодий, а также в отложениях оголенных бортов оврагов с его содержанием в осадках в днищах крупных линейных врезов, позволяет оценить долевым вкладом плоскостного и ручейкового смыва и других экзогенных процессов в денудацию склонов водосбора Бодомо. При этом учитывается вероятный вклад каждого из потенциальных источников наносов в содержание ¹³⁷Cs в осадках, переотложившихся в днище основного вреза (табл. 4). Полученные соотношения свидетельствуют о том, что линейная эрозия и осыпные процессы, развивающиеся на крутых оголенных стенках линейных врезов, являются основными денудационными процессами на водосборе. Вклад плоскостного и ручейкового смыва в суммарную денудацию в целом, видимо, не превышает 20%, несмотря на достаточно высокие темпы такового на пашне. Это связано со сравнительно небольшими площадями пахотных склонов на водосборе Бодомо.

Оценка долевого вклада различных источников наносов в суммарный сток наносов на водосборе Бодомо на основе соотношения концентрации изотопа ^{137}Cs

Источник наносов	Число проб	Средняя концентрация изотопа ^{137}Cs , Бк/кг	Разброс концентрации изотопа ^{137}Cs , Бк/кг	Долевой вклад в сток наносов, %
Пастбища разной степени деградированности	11	26.3	11–58	<10
Пашня	9	15.4	9–24	5–20
Борта и днища линейных врезов глубиной свыше 0.3 м	8	0.5	0–1.5	80–90
Аккумулятивные участки днищ	3(24)*	2.8	1.3–4.1 (1.1–5.6)**	100

* – число индивидуальных проб (послойный отбор), учтенных при расчетах; ** – разброс концентраций изотопа в индивидуальных пробах.

Таким образом, на основе использования радиоизотопного метода удалось установить, что наиболее значительный смыв в пределах водосбора Бодомо наблюдается на участках, занятых пашней. Здесь суммарные ежегодные потери почвы составляют 50–60 т/га, а при распашке крутых склонов ($>15\text{--}25^\circ$) – вплоть до 80–90 т/га в год. На умеренно выбитых пастбищах смыв почвы превышает 10 т/га в год, тогда как сильно выбитые пастбища трансформируются в бедленды. На пастбищных склонах с высоким проективным покрытием поверхности почвы даже при высоких уклонах темпы смыва составляют 4–6 т/га в год. Пашня в пределах водосбора занимает сравнительно небольшие площади и поэтому плоскостной и мелкоручейковый смыв с различных угодий играет подчиненную роль в суммарной денудации с водосбора Бодомо. Основная доля наносов формируется за счет линейного прироста и углубления овражных форм различных размеров, начальные звенья овражной сети развиваются в пределах сильно выбитых участков скотопогонов. Вероятно, наиболее интенсивная денудация наблюдается при выпадении сравнительно редких ливней с высокой интенсивностью. Последующий анализ метеорологической информации вместе с результатами стационарных наблюдений за темпами ежегодного прироста линейных эрозионных форм позволят количественно оценить суммарные темпы современных денудационных процессов на исследуемом водосборе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yair A., Goldberg P., Brimer B. Long term denudation rates in the Zin-Havarim badlands, northern Negev, Israel // *Badland Geomorphology and Piping*. Norwich: Geobooks, 1982. P. 279–291.
2. Wise S.M., Thornes J.B., Gilman A. How old are the badlands? A case study from south-east Spain // *Badland Geomorphology and Piping*. Norwich: Geobooks, 1982. P. 259–279.
3. Salvati L., Bajocco S. Land sensitivity to desertification across Italy: past, present, and future // *Applied Geography*. 2011. V. 31. P. 223–231.
4. Della Seta M., Del Monte M., Fredi P., Lupia Palmieri E. Space-time variability of denudation rates at the catchment and hillslope scales on the Tethyan side of Central Italy // *Geomorphology*. 2009. V. 107. P. 161–177.
5. Ciccacci S., Galiano M., Roma M.A., Salvatore M.C. Morphological analysis and erosion rate evaluation in badlands of Radicofani area (Southern Tuscany – Italy) // *Catena*. 2008. V. 74. P. 87–97.
6. Шукун И.С. Геоморфология Средней Азии. М.: Изд-во МГУ, 1983. 420 с.
7. Wolfgramm B. Land use, soil degradation and soil conservation in the Loess Hills of Central Tajikistan. PhD dissertation. Bern: Centre of Development and Environment, University of Bern, 2007. 209 p.
8. Eggenberger S. Effects of labour migration on rural livelihoods in Tajikistan. With a special regard on the interlinkages to agricultural land use. Diploma Thesis. Zurich: Department of Geography, University of Zurich, 2011. 112 p.

9. Финько Е.А., Цветков Д.Г. Изучение некоторых экзогенных процессов в горном районе Таджикистана аэрофотограмметрическим методом // Геоморфология. 1976. № 3. С. 38–48.
10. James L.A., Watson D.G., Hansen W.F. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA // Catena. 2007. V. 71. P. 132–144.
11. Glenn N.F., Streutker D.R., Chadwick D.J. et al. Analysis of LiDAR-derived topography information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity // Geomorphology. 2006. V. 73. P. 131–148.
12. Perroy R. L., Bookhagen B., Asner G. P., Chadwick O. A. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California // Geomorphology. 2010. V. 118. P. 288–300.
13. Рысин И.И. Овражная эрозия в Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 1998. 185 с.
14. Голосов В.Н., Панин А.В. Осыпные процессы на склонах оврагов в низкогорной зоне Западного Тянь-Шаня // Геоморфология. 1988. № 3. С. 46–50.
15. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
16. Buhlmann E., Wolfgramm B., Maselli D. et al. Geographic information system-based decision support for soil conservation planning in Tajikistan // Journ. of Soil and Water Conservation. 2010. V. 65. P. 151–159.
17. Walling D.E., He Q., Appleby P.G. Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations // Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides. Amsterdam: Kluwer, 2003. P. 111–164.
18. Loughran R.J. The use of the environmental isotope cesium-137 for soil erosion and sedimentation studies // Trends in Hydrology. 1994. V. 1. P. 149–167.
19. Pennock D.J., Lemmon D.S., de Jong E. Cesium-137 measured erosion rates for five parent-material groups in southwestern Saskatchewan // Canadian Journ. of Soil Science. 1995. V. 75. P. 205–210.
20. Owens P.N., Walling D.E., He Q. et al. The use of cesium-137 measurements to establish a sediment budget for the Start catchment, Devon, UK // Hydrological Science Journ. 1997. V. 42. P. 405–423.
21. Голосов В.Н. Использование радионуклидов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
22. Маркелов М.В., Голосов В.Н., Стукин Е. Д. Возможности использования ^{210}Pb и ^{137}Cs в качестве радиоактивных меток для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов // Метеорология и гидрология. 2005. № 4. С. 66–84.
23. Belyaev V.R., Wallbrink P.J., Golosov V.N. et al. A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia // Geomorphology. 2005. V. 65. P. 173–193.
24. Lowrance R.S., McIntyre S., Lance C. Erosion and deposition in a field/forest system estimated using cesium-137 activity // Journ. of Soil and Water Conservation. 1988. V. 43. P. 195–199.
25. Navas A., Walling D.E. Using cesium-137 to assess sediment movement in a semiarid upland environment in Spain // Erosion, debris flows and environment in mountain regions. Wallingford: IAHS Publ., 1992. V. 209. P. 129–138.
26. Porto P., Walling D.E., Ferro V. Validating the use of cesium-137 measurements to estimate soil erosion rates in a small drainage basin in Calabria, Southern Italy // Journ. of Hydrology. 2001. V. 248. P. 93–108.
27. 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. V. 29. P. 1–10.
28. Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements // Journ. of Environment Quality. 1999. V. 28. P. 611–622.
29. Mabit L., Benmansour M., Walling D.E. Comparative advantages and limitations of fallout radionuclides (^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be) to assess soil erosion and sedimentation // Journ. of Environmental Radioactivity. 2008. V. 99. P. 1799–1807.
30. Turkelboom F., Poesen J., Ohler I. et al. Assessment of tillage erosion rates on steep slopes in northern Thailand // Catena. 1997. V. 29. P. 29–44.

Московский государственный университет
 Географический факультет,
 Центр развития территорий и окружающей среды
 Университет г. Берна, Швейцария

Поступила в редакцию
 19.06.2012

AN ASSESSMENT OF SEDIMENT REDISTRIBUTION ON THE SLOPES OF SMALL CATCHMENT IN THE LOESS ZONE OF TADJIKISTAN BY USING RADIOCESIUM DATING

H.N. SAFAROV, M.V. MARKELOV, V.N. GOLOSOV, B. WOLFGRAMM

S u m m a r y

A quantitative evaluation of the of sediment redistribution velocity within the Bodomo catchment (Central Tadjikistan) was fulfilled. On the base of radiocesium method annual soil loss was determined for different enclosures and their contributions to total denudation in the catchment were evaluated. It was shown that maximal losses (including the contribution of water and mechanical erosion) occur on the croplands and reach 50–90 ton/hectare per year, while at grasses with different degree of degradation they are less than 4–10 ton/hectare per year. Sheet and rill sediment runoff constitute less than 10% of total denudation from the catchment, for the main contribution is that of gulley erosion and screes.