

Научные сообщения

УДК 551.435.1 → 551.438.5:661.6(470.331)

© 2004 г. Ю.Р. БЕЛЯЕВ, В.Р. БЕЛЯЕВ, В.Н. ГОЛОСОВ, М.В. МАРКЕЛОВ

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕЛЬЕФА МАЛОГО ВОДОСБОРА РАЙОНА ТОРЖОКСКОЙ КОНЕЧНО-МОРЕННОЙ ГРЯДЫ ЗА ПЕРИОД АГРИКУЛЬТУРНОГО ОСВОЕНИЯ¹**Введение**

Активная хозяйственная деятельность человека и его вмешательство в ход природных процессов в последние столетия оказали существенное влияние на интенсивность экзогенных процессов, в том числе в пределах равнин умеренного пояса. Расширение площади пахотных земель способствовало усилению интенсивности плоскостного и ручейкового смыва и овражной эрозии, а также обвально-осыпных, а местами и оползневых процессов, активизирующихся по бортам активно растущих овражных врезов. Отличительной особенностью сравнительно молодого рельефа ледниковых равнин является невысокая густота овражной сети, связанная с недостаточной для развития линейной эрозии длиной склонов. В результате основную роль в трансформации рельефа сельскохозяйственно освоенных водосборов играют процессы плоскостного и ручейкового смыва в сочетании с механическим перемещением почвы при перепахивании и аккумуляцией наносов, как в пределах обрабатываемых склонов, так и в днищах долинных понижений первых порядков, являющихся верхними звеньями флювиальной сети.

Согласно результатам прямых наблюдений за стоком воды и наносов в период снеготаяния интенсивность эрозионных процессов на пахотных склонах области вторичных ледниковых равнин в среднемноголетнем разрезе не превышает 1 т/га × год, хотя в отдельные годы и может достигать 6–8 т/га × год [1–4]. Регулярные наблюдения за смывом почвы в период ливневого стока не проводились. Суммарный смыв почвы, установленный расчетом по эрозионным моделям, в среднем для Тверской области составляет 5.4 т/га × год [5].

Для оценки изменения морфологии рельефа вследствие развития эрозионно-аккумулятивных процессов в области ледникового рельефа за период интенсивного сельскохозяйственного освоения были проведены детальные исследования перераспределения материала на малом водосборе с предельной для лесной зоны площадью пашни и значительными уклонами пахотных склонов, расположенного в бассейне р. Осуги, правобережного притока Тверцы. Для оценки темпов смыва и аккумуляции наносов использовалось несколько методов исследований, что позволило более достоверно оценить суммарное воздействие длительной распашки на рельеф водосбора.

Морфология рельефа и земледельческое освоение района исследований

Для исследований выбрана территория, расположенная на юге северной части Русской равнины, непосредственно к югу от ее главного водораздела, проходящего

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 01-05-64503) и в рамках программы поддержки ведущих научных школ России (проект НШ – 1443.2003.5).

через Валдайскую возвышенность. Основные черты ее рельефа – достаточно крупные грядово-холмистые возвышенности (Торжокская, Лихославльская и др. гряды), разделенные низинами, к которым приурочены долины главных рек – Тверцы, Осуги и Тьмы. Гряды сложены ледниковыми отложениями с включениями крупных известняковых отторженцев [6] и по существующим представлениям сформировались при деградации среднеплейстоценового покровного оледенения [7, 8], хотя отсутствие покровных отложений и невыработанность эрозионного рельефа района позволяют предполагать их валдайский возраст. Низины, разделяющие гряды, выстланы толщей песков водно-ледникового происхождения мощностью до 6 м [6]. Они представляют собой ныне практически осушенные бассейны талых ледниковых вод (Вышневолоцкая низина) или ложбины стока.

Речная сеть достаточно или относительно равномерно распространена по площади. Плотность малых эрозионных форм (долины первых порядков и овраги) невысокая ввиду относительной молодости и слабой контрастности рельефа и широкого распространения устойчивых к эрозии отложений (морена). Значительная густота горизонтального расчленения оврагами отмечается только на крутых бортах долин Тверцы и Осуги в пределах Торжокской гряды. Наиболее распространенными формами эрозионного рельефа являются малые водосборы ложбинно-долинного типа, в значительной степени унаследованные со времени деградации последнего покровного оледенения и отличающиеся внешне слабой переработкой эрозионно-аккумулятивными процессами. Их можно разделить на две группы. В одну входят малые водосборы с длинными (свыше 400 м) выпукло-вогнутыми склонами и узким (менее 5 м) четко выраженным понижением ложбинного типа с корытообразным поперечным профилем, короткими крутыми бортами и относительно не выработанным продольным профилем. Отсутствие следов аккумуляции в днище позволяет отнести эти водосборы к транзитному типу: наносы, смытые со склонов и непереотложившиеся в пределах пашни, преимущественно в пределах вогнутых подножий склонов, транспортируются по ложбинному понижению в речную долину. Другую группу составляют водосборы с корытообразным, переходным к выположенному U-образному, поперечным профилем, не очень широкими (до 30–40 м) плоскими днищами, осложненными слабо и неповсеместно выраженными современными врезами глубиной в первые десятки сантиметров. Склоны в основном выпукло-вогнутые и расчленены ложбинами водноледникового происхождения, доходящими местами почти до водоразделов. Тыловые швы днища нечеткие, но границы хорошо подчеркиваются растительностью. Морфология этих малых долин позволяет предположить, что определенная часть наносов, смытых со склонов, аккумулируется в днище, постепенно заполняя его.

Верхняя часть бассейна Тверцы, в котором находится район исследований, относится к зоне смешанных, преимущественно вторичных лесов. Достаточно большое (около 600 мм) количество осадков равномерно распределено в течение года; практически ежегодно формируется талый сток, периодически выпадают стокоформирующие дожди. Эрозионный индекс осадков, рассчитанный по данным метеостанции г. Торжок, составляет 6.8 единиц. В пределах склонов междуречий распространены дерново-подзолистые почвы, сформировавшиеся на морене или зандровых песках.

Значительные площади относительно плоских водораздельных поверхностей, характерных для этой территории, заболочены вследствие избыточного увлажнения и слабой дренированности. Это явилось причиной характерной для значительной части территорий лесной зоны умеренного пояса последовательности земледельческого освоения различных элементов рельефа [9]. В первую очередь распахивались хорошо дренируемые склоны, и только затем переувлажненные приводораздельные пространства и подножия склонов.

Основными культурными растениями, высевавшимися на поля Тверской губернии, были яровые: рожь, овес, ячмень и пшеница [10, 11], хотя к 1870 г. доля последней в севооборотах снизилась на порядок [10]. Немаловажным является тот факт,

что наиболее “эрозионноопасные” пропашные культуры практически не культивировались. Достоверно судить о том, какие земли распахивались, а какие – нет, можно начиная с середины XVIII в., когда были составлены первые планы генерального межевания. По данным М.А. Цветкова [12], анализируя архивные материалы, максимум распашки приходится на середину XIX в., то есть на время проведения земельной реформы (до 38–39% земель под пашней), а после этого она начинает убывать.

В советское время распашка несколько интенсифицировалась, началось активное применение тяжелой сельскохозяйственной техники, но доля пахотных земель в целом по области не превышала 30%. Произошел переход от преобладания яровых к озимым зерновым, доля пропашных (картофель) не достигала значительных величин. После 1991 года значительная часть пахотных земель была заброшена, а на оставшихся под пашней землях преимущественно выращиваются многолетние травы. В связи с этим в целом по региону значительно снизилась эрозионная опасность пашни.

Объект и методика исследований

В качестве ключевого объекта для детальных исследований трансформации рельефа за период земледельческого освоения был выбран малый водосбор временного водотока – левого притока р. Вельи площадью $\approx 0.81 \text{ км}^2$ (81 га), расположенный в бассейне р. Осуги в 15 км к ЗЮЗ от г. Торжка (рис. 1а), между деревнями Исаково и Печки. Первое упоминание о них относится к концу XVII столетия [10, 13, 14]. Продолжительность распашки водосбора составляет не менее 300 лет. Его верховья примыкают к одной из самых высоких точек Торжокской гряды с абсолютными высотами около 230 м. Водосбор имеет четко выраженное в рельефе долинное понижение с днищем шириной 30–40 м, на большем протяжении заболочены. Склоны различной конфигурации с преобладающей крутизной 2–6° расчленены серией ложбин, днища которых в основном не распахиваются, за исключением верховьев ложбин в ЮЗ части водосбора. Большая часть водосбора до сих пор занята пашней, но в последние годы высеваются преимущественно многолетние травы. Обрабатываемые земли занимают около 65 га, т.е. порядка 80% всей площади водосбора. Днище долины наследует понижение в кровле ледниковых отложений, слагающих гряду, и имеет практически прямой, слегка вогнутый в верхнем течении продольный профиль (рис. 2а) со средним уклоном 0.021 при длине тальвега 1.62 км.

Для детальных исследований была выбрана верхняя часть водосбора (до насыпной дороги), площадью $\approx 0.54 \text{ км}^2$ (54 га), в пределах которой представлены все характерные для водосбора типы склонов и расчленяющих их понижений (рис. 1б). На начальном этапе исследований было проведено предварительное крупномасштабное геоморфологическое картографирование территории, в результате которого выделены пологонаклонные приводораздельные поверхности, различные типы склонов и днища малых эрозионных форм. В пределах каждого из выделенных типов склонов заложены разрезы по почвенно-морфологическим профилям, повторяющим линии тока. Аналогично на различных участках днищ заложены разрезы по поперечным профилям. Всего заложено 67 разрезов, в ключевых отбирались образцы для радионуклидных и почвенных анализов. На основании описания разрезов подробно исследовано геологическое строение днища долины и ее водосбора. Площади выделенных элементов рельефа водосбора и положение разрезов были определены при помощи съемки системой GPS геодезической точности, работающей в дифференциальном режиме. В результате построена цифровая модель рельефа, на основе которой в дальнейшем проводился расчет по эрозионной модели и составлялись карты типов склонов.

Для более точной оценки темпов и объемов перемещения вещества использовались несколько независимых методов. Темпы эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах рассчитывались по эрозионной модели, почвенно-эрозионным и радио-

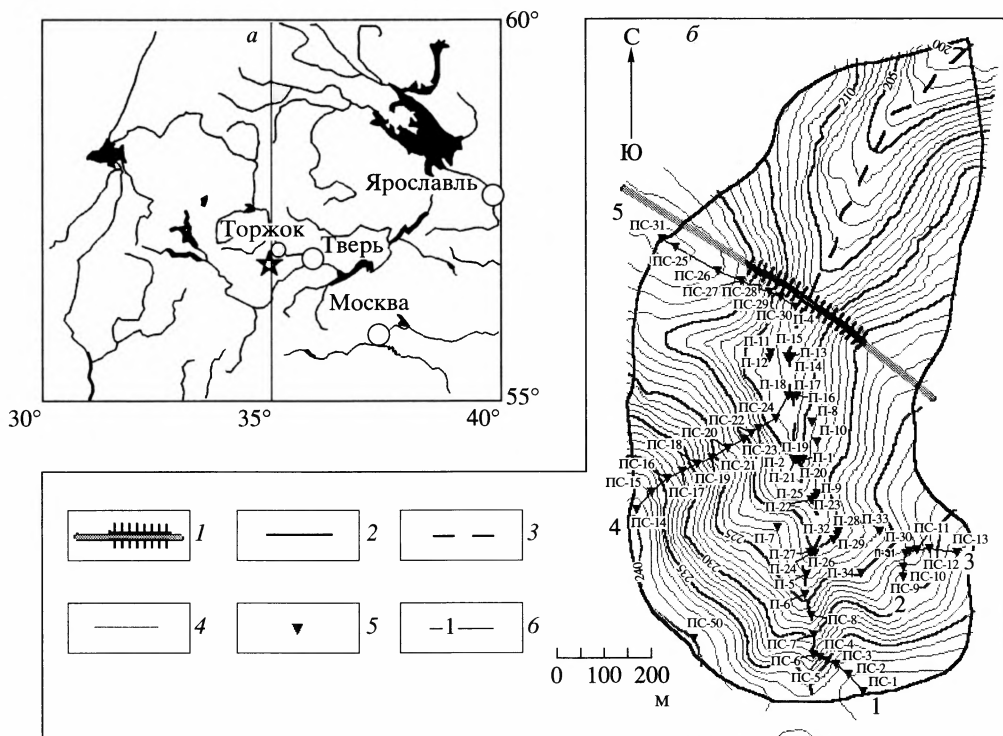


Рис. 1. Географическое положение объекта исследований (а) и общая схема водосбора с положениями геологических разрезов и склоновых профилей (б)

1 – дорога (насыпь), 2 – граница водосбора, 3 – тальвег, 4 – изогипсы, 5 – разрезы, б – линии и номера профилей

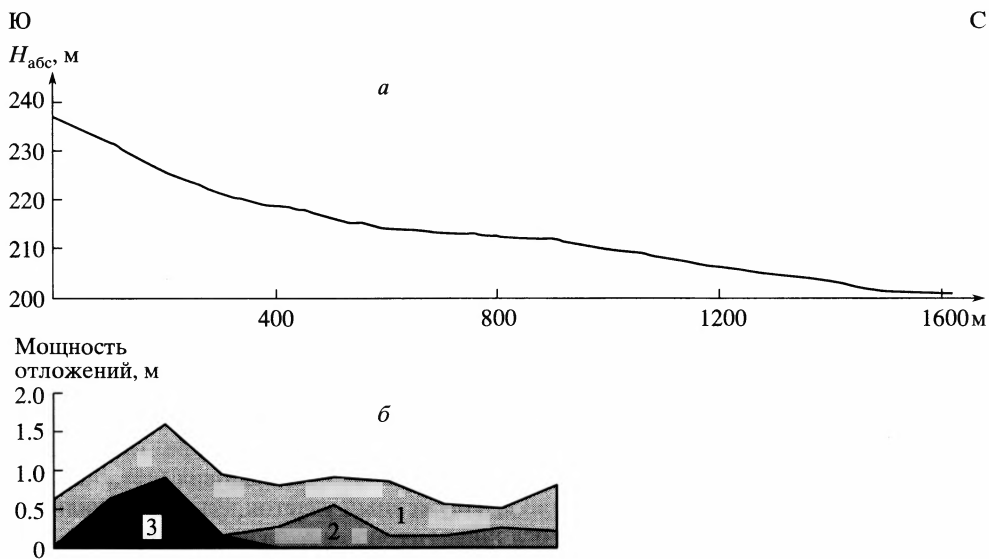


Рис. 2. Продольный профиль по тальвегу (а) и мощности различных генераций отложений в днище (б)
Отложения: 1 – третьей генерации (супесчано-суглинистые наносы периода интенсивного сельскохозяйственного освоения), 2 – второй генерации (песчано-суглинистый с включениями грубообломочного материала базальный горизонт), 3 – первой генерации (алевриты и алевритистые пески)

цезиевым методами. Аккумуляция в днищах оценивалась на основании детальных геологических описаний разрезов, а также радиоцезиевым методом.

Почвенно-морфологический метод. Изучение эрозии и аккумуляции на пахотных землях почвенно-морфологическим методом заключалось в сопоставлении мощностей почвенных горизонтов до иллювиального включительно в разрезах, расположенных в геоморфологически стабильных эталонных участках, и разрезах, заложенных по профилям вдоль линий тока на пахотных склонах различного типа. В литературе предложен ряд качественных показателей, позволяющих выделять слабо-, средне- и сильносмывтые почвы по набору затронутых вспашкой генетических горизонтов почв различных типов [15]. На основании подобной качественной оценки проводится картографическое выделение ареалов смытых и намытых почв. Определив величину смытого или намытого слоя в каждой конкретной точке и зная среднюю объемную плотность пахотного горизонта, можно перейти к количественным показателям средних темпов эрозионно-аккумулятивных процессов за весь период распашки. Следует учитывать, что эта интегральная величина включает и влияние других процессов, таких как перемещение почвы орудиями обработки, а также ее вынос при уборке корнеплодов.

В качестве эталонных использовались два разреза на выровненных приводораздельных частях склоновых профилей, где почвы находятся в относительно стабильном состоянии. Первый из разрезов располагался на пашне, второй – на нераспаханном участке плоского водораздела. Расчеты проводились по всем пяти склоновым профилям (рис. 1б) отдельно для всего периода землепользования (300 лет) и для периода с 1954 г. (для сравнения с результатами расчетов по ^{137}Cs). Во втором случае делалось допущение, что средние темпы эрозионно-аккумулятивных процессов оставались постоянными. При переходе к количественной оценке темпов эрозионно-аккумулятивных процессов ошибка почвенно-морфологического метода принималась равной $\pm 20\%$, что соответствует установленной натурными наблюдениями вариабельности общей мощности продуктивных горизонтов дерново-подзолистых почв в естественных условиях [15].

Радиоизотопный метод. Радиоактивный изотоп (^{137}Cs , период полураспада 30.2 года) давно и успешно применяется в различных регионах мира для оценки современных темпов эрозионно-аккумулятивных процессов [16]. В основе методики лежит свойство радионуклида быстро и необратимо фиксироваться почвенно-поглощающим комплексом, вследствие чего после выпадения на земную поверхность его дальнейшая миграция происходит преимущественно вместе с частицами почвы [17, 18]. Подробный обзор использования радиоцезиевого метода в исследованиях эрозионно-аккумулятивных процессов был сделан В.Н. Голосовым [19].

На распахиваемых склонах водосбора по профилям был проведен отбор интегральных проб почв на содержание изотопов ^{137}Cs . Пробы отбирались до глубины подошвы пахотного горизонта (25–29 см), диагностируемого в почвенном разрезе. В некоторых точках были дополнительно отобраны образцы из слоя мощностью 5–10 см, лежащего ниже плужной подошвы. Площадь отбора составляла 8×8 см. В днище долины (рис. 3б–г) и на залуженном склоне (подножие длинного склона) послыной опробованы 4 разреза. Максимальная глубина отбора менялась в зависимости от литологического строения аккумулятивной толщи в пределах 30–45 см. Площадь отбора послыных образцов составляла 20×20 см, интервал – 3 см. Для оценки объема выпадения изотопа из атмосферы на западном плоском водоразделе обследовался стабильный в геоморфологическом отношении опорный залуженный участок. Здесь был заложен и детально описан почвенный разрез с послыным отбором образцов до глубины 30 см с интервалом 3 см (рис. 3а).

Подготовка (сушка, гомогенизация) и гамма-спектрометрический анализ проб почвы проведены в лаборатории Института глобального климата и экологии, аттестованной Государственным научным метрологическим центром Госстандарта РФ. Время экспозиции пробы на детекторе составляло не менее 10 часов и определялось

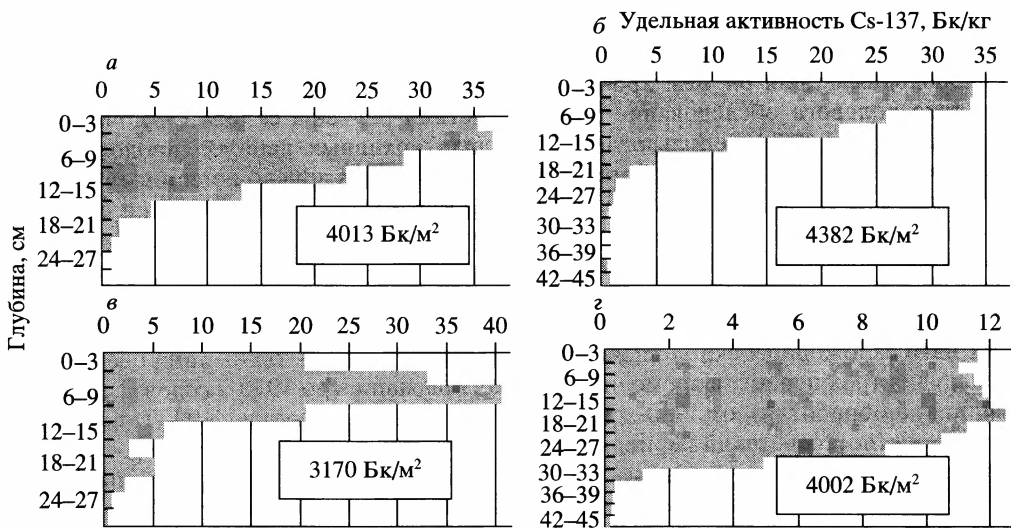


Рис. 3. Эпюры глубинного распределения удельной активности ^{137}Cs и общие запасы изотопа в полойных разрезах

Разрезы: а – ПС-31, б – П-25, в – П-21, г – П-6

достоверным фиксированием гамма-пика ^{137}Cs со статистической погрешностью в основном около 5–7%.

Для перехода от содержания изотопа ^{137}Cs к количественным характеристикам средних темпов эрозионно-аккумулятивных процессов за последние 48 лет использовалась улучшенная балансовая модель, учитывающая динамику выпадения изотопа из атмосферы [20]. Темпы аккумуляции в днищах малых эрозионных форм определялись на основании сравнения профилей распределения изотопа по глубине в днище и на ненарушенном эталонном участке.

Расчет смыва почв по эрозионной модели. Для расчетов смыва почвы с пашни использовалась эрозионная модель, разработанная в НИЛ эрозии почв и русловых процессов и основанная на переработанной версии Универсального уравнения почвенной эрозии (USLE) [21] с дополнением блока расчета талого смыва. В модель включена база данных коэффициентов и разработаны рекомендации по ее применению на территории России. Адаптированная для России версия модели была апробирована во многих районах России и показала удовлетворительные результаты [22].

Основные преимущества модели – относительная простота применения, обеспеченность обширной базой данных, положительный опыт апробирования. Существенным достоинством является также наличие компьютерного интерфейса, дающего возможность быстрой и многократной обработки данных, проверки работы модели при различных величинах основных параметров. Наиболее значительный недостаток всех производных от USLE моделей состоит в привязанности к эмпирическим зависимостям, полученным на небольших по размеру стоковых площадках. Эта проблема частично решена в российской версии модели за счет включения физически обоснованного соотношения между смывом, длиной и уклоном склона, однако полностью решить ее невозможно. Также недостатком использованной версии является невозможность учета переотложенного материала на склонах, поэтому модель не может использоваться для изучения пространственного распространения

эрозии и аккумуляции в пределах пахотных склонов, а лишь позволяет оценить средние темпы суммарной деградации почвы за определенный период времени.

Необходимые для работы эрозионной модели параметры были получены в результате полевого обследования (характеристики рельефа склонов и почв, современный характер землепользования), анализа архивных данных (продолжительность активного освоения, характер землепользования в дореволюционный период). Частично данные были предоставлены сотрудниками НИЛ эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ (показатели смыва почв, типичные севообороты советского периода) (Л.Ф. Литвин, устное сообщение) или взяты из базы данных, включенной в компьютерную реализацию модели (характеристики осадков, противоэрозионные индексы растительности). Моделирование проводилось для всех пяти заложённых склоновых профилей (рис. 1б). Расчеты были проведены отдельно для трех периодов времени – от начала распахки до 1930-х годов (период домашинной обработки), от 1930-х до 1990 г. (советский период) и с 1990 г. по настоящее время (постсоветский период), характеризующихся качественными различиями технологий обработки почвы и севооборотов. Затем осредненные темпы эрозии почв рассчитывались отдельно для всего периода землепользования (300 лет) и для периода с 1954 г. (для сравнения с результатами расчетов по ^{137}Cs).

Основные результаты

Определение запаса ^{137}Cs на опорном участке. Общий запас изотопа в разрезе, заложённом на опорном участке, составляет 4013 Бк/м^2 . Практически весь ^{137}Cs (93%) содержится в верхних 15 см (рис. 3а). Пик максимальной концентрации достаточно четкий и слегка заглублен, располагаясь в интервале глубин 3–6 см. Ниже этой глубины концентрация изотопа постепенно уменьшается, а с глубины 21 см становится незначительной. Наблюдаемый вид глубинного распределения содержания изотопа отличается от характерного для районов с незначительной долей чернобыльских выпадений, имеющего вид гауссоиды. Моделирование вертикальной миграции и диффузии изотопа [23] позволило определить долю изотопа, выпавшего на изучаемую территорию в 1986 г., составившую около 20%. Подобный вид распределения изотопа по глубине вместе с почвенным описанием позволяют утверждать, что исследуемый опорный участок не был антропогенно нарушенным по крайней мере с 1954 г., и измеренный в его пределах запас изотопа отражает общий объем выпадения изотопа ^{137}Cs из атмосферы (с поправкой на радиоактивный распад).

Оценка перераспределения наносов на склонах. На основании морфологической схемы исследуемого участка водосбора (рис. 4а), включающего поверхности с различными углами наклона (субгоризонтальные поверхности, склоны крутизной $2\text{--}4^\circ$, склоны крутизной более 4° , днища ложбин-притоков, основное днище) и структурные линии (бровки, тыловые швы, выпуклые и вогнутые перегибы склонов), были выделены три основных типа склонов. Каждый из них был охарактеризован заложёнными профилями (рис. 1б). Анализ разрезов показал, что длительная история землепользования привела к значительной трансформации почвенного покрова по сравнению с ненарушенными территориями. Средне- и сильноэродированные почвы занимают более 60% склонов водосбора, здесь в пахотный слой вовлечены горизонты В, а местами и ВС. На локальных участках подножий склонов и в пределах вогнутых перегибов внутри длинных склонов часть мобилизованного материала переотлагается, остальные наносы поступают в днище. Последующий анализ результатов оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов показал, что выделенные типы склонов также различаются по механизмам функционирования этих процессов и отражающей их величине среднего коэффициента доставки наносов (рис. 4б).

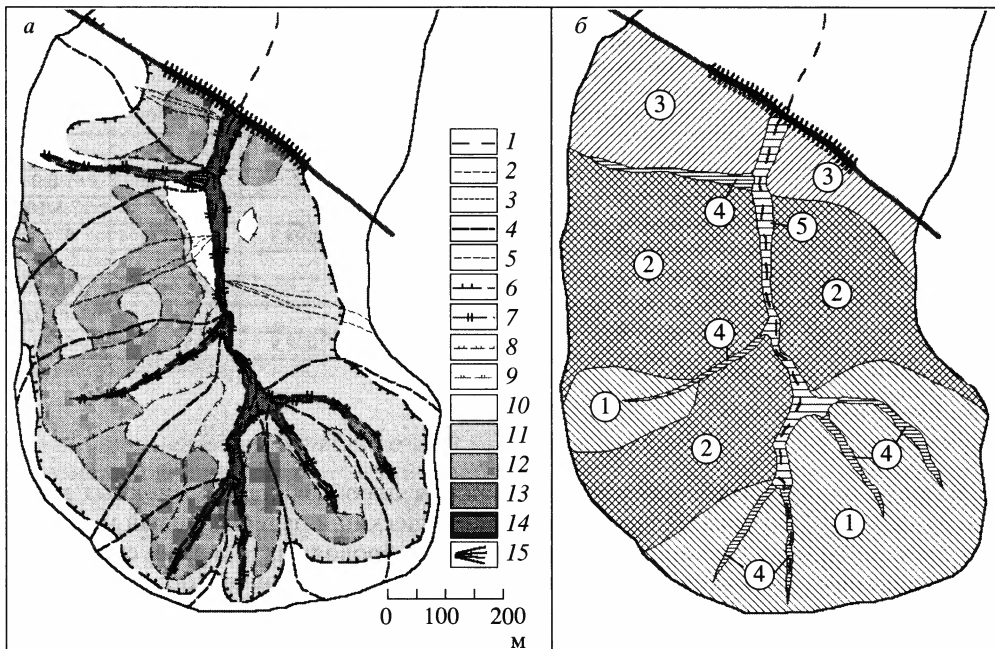


Рис. 4. Морфологическая схема исследуемой части водосбора (а) и схема типизации склонов по морфологии и коэффициенту доставки наносов (б)

а – тальвеги: 1 – малой длины, 2 – ложбин-притоков, 3 – склоновых потяжин; водосборы: 4 – ложбин-притоков, 5 – склоновых потяжин; нечеткие: 6 – бровки приводораздельных поверхностей, 7 – тыловые швы днищ, 8 – выпуклые перегибы склонов, 9 – вогнутые перегибы склонов; 10 – слабонаклонные поверхности (углы наклона < 2°); склоны крутизной: 11 – 2–4°, 12 – 4–8°; днище: 13 – ложбин-притоков, 14 – малой долины; 15 – конус выноса.

б – склоны: 1 – короткие (до 200 м) выпуклые и выпукло-вогнутые, 2 – длинные (до 400 м и более) сложной формы, 3 – средние (250–350 м) выпуклые; днище: 4 – ложбин-притоков, 5 – малой долины

Тип 1 – это короткие (менее 200 м) склоны верхней части водосбора, преимущественно выпуклые и выпукло-вогнутые. Они занимают около 17.4 га, что составляет 32% от общей площади детальной изученной части водосбора. Эти склоны, в пределах которых были заложены профили 1–3 (рис. 16), в свою очередь можно подразделить на три подтипа. Наиболее короткие (до 100 м) выпуклые рассеивающие склоны характерны для участков водоразделов между основным тальвегом и ложбинами-притоками. Выпуклые склоны длиной от 100 до 200 м с выраженной плоской приводораздельной частью опираются на основной тальвег. Остальная площадь занята выпукло-вогнутыми склонами.

Результаты расчетов характеристик эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах 1-го типа представлены в табл. 1. Все три использованных метода дали сходные величины среднегодовых темпов эрозии (6.8 т/га × год по почвенно-морфологическому методу, 7.8–9.4 т/га × год по эрозионной модели и 6.9 т/га × год по радиоцезиевому методу). Снижение этой величины в последние 48 лет по эрозионной модели отражает переход в постсоветское время к преимущественному выращиванию многолетних трав. Почвенно-морфологический метод дает только интегральную оценку трансформации почв за весь период распашки. По радиоцезиевому методу не была выявлена зона аккумуляции в нижней вогнутой части склона на профиле 1, выделенная при полевом описании разрезов и почвенно-морфологическим методом (разрез ПС-5, рис. 16). Это связано, вероятно, с недостаточной глубиной отбора образцов, что привело к занижению общего запаса ¹³⁷Cs в этой точке.

**Характеристики эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах 1-го типа (рис. 3б)
на основании расчетов по профилям № 1, 2 и 3**

Метод	Почвенно-морфологический		Эрозионная модель		¹³⁷ Cs*
	300	48	300	48	
Период, годы	300	48	300	48	48
Эрозия, т/га × год	6.8		9.4	7.8	6.9
Площадь зон эрозии, га/%	13.0/74.9		–	–	17.4/100.0
Эрозия за период, т	26580.0	4252.8	49099.9	6513.6	5762.8
Аккумуляция, т/га × год	3.3		–	–	0.0
Площадь зон аккумуляции, га/%	3.7/13.8		–	–	0.0/0.0
Аккумуляция за период, т	3660.0	585.6	–	–	0.0
Вынос за период, т	22920.0	3667.2	49099.9	6513.6	5762.8
Коэффициент доставки наносов, %	86		–	–	100

* – Только по профилю № 1.

В целом все три метода адекватно отражают преобладание эрозионных процессов на склонах 1-го типа. Почвенно-морфологический и радиоцезиевый методы показывают, что наиболее эродированы почвы прирвовочных участков склонов. Это свидетельствует о совместной активности эрозии и механического перемещения почвы при перепахивании, при значительной роли последнего процесса. Поскольку по радиоцезиевому методу не удалось определить темпы осадконакопления в нижней части склона из-за недостаточной глубины отбора проб в нижней части склона, оценить пространственное распределение и долю зон эрозии и аккумуляции позволяет только почвенно-морфологический метод. Исходя из него, зоны эрозии занимают 74.9% от всей площади склонов, а аккумуляции – 13.8%. Доля наносов, выносимых со склонов этого типа в днища эрозионных форм, велика и составляет от 68 до 100%. Этому способствует простая морфология склонов и отсутствие рубежей промежуточной аккумуляции. Незначительное переотложение материала наблюдается только непосредственно у подножий склонов в тыловых швах днищ и, вероятно, на границах пашни.

К типу 2 относятся длинные (до 400 м и более) склоны сложной морфологии, распространенные в средней части водосбора, отдельный сегмент также имеется в его верхней части (рис. 4б). Обобщенно форму продольного профиля можно охарактеризовать как выпукло-вогнутую. Однако практически повсеместно склоны осложнены локальными перепадами уклонов и террасовидными поверхностями в нижних частях. Сочленение склонов с днищами эрозионных форм менее четкое, чем для 1-го типа. Тыловые швы слабо выражены, переход представлен зонами шириной первые десятки метров и крутизной 2–4°. Лишь там, где с нижней границей склонов совпадает напашь, она четко читается в рельефе. Площадь склонов 2-го типа составляет 24.7 га, или около 46% исследуемой части водосбора. Наряду с зонами сильно деградированных почв здесь выделяются участки внутрисклоновой аккумуляции, приуроченные к вогнутым перегибам и террасовидным поверхностям.

Результаты расчетов характеристик эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах 2-го типа представлены в табл. 2. В отличие от склонов 1-го типа полученные средние темпы смыва по эрозионной модели (15.4–18.5 т/га × год) и радиоцезиевому методу (25.8 т/га × год) превышают результат почвенно-морфологического метода (6.0 т/га × год) в 2.5–3 и более чем в 4 раза соответственно. Возможной причиной столь завышенной оценки эрозионной моделью является неучет ею внутрисклонового переотложения материала. По-видимому, данную модель не следует применять для склонов сложных конфигураций, либо необходимо разбивать склон на отрезки элементарной формы и проводить расчеты для каждого из них по отдельности. Завышенные результаты радиоцезиевого метода могут быть связаны со следующими при-

**Характеристики эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах 2-го типа (рис. 3б)
на основании расчетов по профилю № 4**

Метод	Почвенно-морфологический		Эрозионная модель		¹³⁷ Cs
	300	48	300	48	
Период, годы	300	48	300	48	48
Эрозия, т/га × год	6.0		18.5	15.4	25.8
Площадь зон эрозии, га/%	15.4/62.4		–	–	16.1/65.3
Эрозия за период, т	27750.0	4440.0	137278.9	18249.6	19938.2
Аккумуляция, т/га × год	8.1		–	–	6.7
Площадь зон аккумуляции, га/%	9.3/37.6		–	–	8.6/34.7
Аккумуляция за период, т	22530.0	3604.8	–	–	2764.8
Вынос за период, т	5220.0	835.2	137278.9	18249.6	17173.4
Коэффициент доставки наносов, %	19		–	–	86

чинами: в применяемой калибровочной модели не учитывается вклад механического перемещения почвы при перепаживании; некоторая доля изотопа могла удаляться с открытых пространств со снегом (более 50% осадков в Тверской области выпадает в виде снега, следовательно, его перераспределение ветром и снеготаяние по неоттаявшей почве могут привести к потере части запаса изотопа до момента его фиксации на почвенных частицах [24]); возможен вынос почвы, содержащей ¹³⁷Cs, с колесами техники и на колесах техники (который по ряду оценок может достигать 5 т/га · год [25]).

Несмотря на значительный разброс величин, почвенно-морфологический и радиоцезиевый методы показали сходное пространственное положение и величину зон эрозии (62.4–65.3% площади склонов) и аккумуляции (37.6–34.7%). Значительная эродированность почв прибрежной части склона свидетельствует о перераспределении почвы при перепаживании. Сильнее всего деградированы почвы наиболее крутой средней части склона (разрез ПС-18, рис. 1б), где энергия поверхностного стока максимальна. Средняя интенсивность аккумуляции, полученная радиоцезиевым методом, вероятно, также занижена из-за недостаточной глубины отбора проб. Общая мощность намывного слоя в пределах локальной террасовидной поверхности (разрезы ПС-22, ПС-23, рис. 1б) превышает 0.5 м, он подстилается оторфованным погребенным гумусовым горизонтом. В пределах вогнутого перегиба выше по склону мощность аккумуляции не так значительна, но больше ширина зоны (разрезы ПС-19, ПС-20, рис. 1б). Третий участок переотложения материала расположен в зоне сочленения склона с днищем долины. Согласно почвенно-морфологическому методу, только 19% мобилизованного материала выносится со склона. Поскольку данный тип склонов занимает около половины исследуемой территории, его характеристики оказывают большое влияние на функционирование всего водосбора.

Тип 3 включает в себя средние по длине (250–350 м) выпуклые склоны, расположенные в средней части водосбора вблизи дорожной насыпи (рис. 4б). Они характеризуются относительно длинной (до 20% и более длины склона) субгоризонтальной приводораздельной частью и простой формой продольного профиля с увеличением крутизны вниз по склону и относительно четким сочленением с днищем долины. Площадь склонов 3-го типа 8.7 га, или около 16% исследуемой части водосбора. Результаты расчетов почвенно-морфологическим методом и по эрозионной модели приведены в табл. 3 (отбор образцов для радиоизотопного анализа здесь не проводился). Простая морфология обуславливает закономерное расположение зоны смыва на склоне (порядка 80% общей площади) и полный вынос рыхлого материала в днище долины в многолетнем плане (коэффициент доставки наносов 100%). Средние темпы смыва составляют 6.4 т/га × год по почвенно-морфологическому методу и 11.0–13.3 т/га × год по эмпирической модели, т.е. находятся между полученными величинами для склонов предыдущих двух типов. При этом выделяются две зоны

**Характеристики эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах 3-го типа (рис. 3б)
на основании расчетов по профилю № 5**

Метод	Почвенно-морфологический		Эрозионная модель	
	300	48	300	48
Период, годы	300	48	300	48
Эрозия, т/га × год	6.4		13.3	11.0
Площадь зон эрозии, га	6.8/77.9		–	–
Эрозия за период, т	13020.0	2083.2	34391.5	4561.0
Аккумуляция, т/га × год	0.0		–	–
Площадь зон аккумуляции, га/%	0.0/0.0		–	–
Аккумуляция за период, т	0	0	–	–
Вынос за период, т	13020.0	2083.2	34391.5	4561.0
Коэффициент доставки наносов, %	100		–	–

максимально деградированных почв: верхняя, связанная с развитием механического перемещения почвы при распашке (выпуклый участок приводораздельного склона), и нижняя, где потоки достигают максимальной эродирующей способности (нижняя треть склона).

Аккумуляция в днище. Геологическое строение днища довольно однородно. Практически по всей его длине балочные отложения подстилаются моренными суглинками предположительно валдайского возраста. Мощность собственно балочных отложений не превышает 1.5 м, а в среднем колеблется около 0.8–1 м. Они могут быть разделены на три основные генерации (рис. 2б).

Наносы наиболее древней генерации сохранились лишь в верхней части днища, выше слияния балки с крупным правым притоком-ложбиной. Представлены они относительно мощной (до 1 м) толщей алевритов, вниз по течению переходящих в алевритистые пески и выклинивающихся в районе современного вершинного перепада донного вреза в 260–300 м от “истока”.

Следующую по возрасту генерацию отложений составляет песчано-суглинистый, с включениями грубообломочного материала, базальный горизонт, представленный по всей длине исследованной части тальвега. Максимальной мощности он достигает в районе первого сужения днища, что обусловлено наличием выше этого створа крупного притока и, как следствие, резко возрастающими расходами воды во время ее стока.

Верхняя пачка отложений единым слоем мощностью в первые десятки сантиметров перекрывает днище по всей его длине и сопрягается с современными склоновыми шлейфами. Внутри этой пачки супесчано-суглинистых отложений выделяется серия второстепенных эрозионных границ и аккумулятивных тел, свидетельствующих о неоднократных локальных размывах и переотложении материала. Формирование этих отложений связывается нами с агрикультурным этапом освоения территории. Наряду с подстилающим грубообломочным базальным горизонтом, четким маркером подошвы наносов периода антропогенного освоения служило положение в разрезах прослоя, обогащенного многочисленными включениями пирогенного угля. По нашим представлениям, этот прослой, четко прослеживающийся практически во всех исследованных разрезах в днищах малых эрозионных форм, соответствует первоначальному этапу сведения лесов и распашке водосбора около 300 лет назад. Полученные мощности отложений агрикультурного периода (0.3–0.7 м) и средние скорости осадконакопления (1.0–2.5 мм/год, или 21.2 т/га × год) значительно меньше характерных для аналогичных водосборов степной и лесостепной зон.

Отдельно проводился анализ темпов аккумуляции в днище за цезиевый период. На рис. 3б–г приведены примеры эюр глубинного распределения ¹³⁷Cs в разрезах в различных частях днища. В разрезе П-25 (рис. 3б) в средней части днища наблюдает-

Обобщенные характеристики эрозионно-аккумулятивных процессов для исследованной части водосбора

Метод	Почвенно-морфологический		Эрозионная модель		¹³⁷ Cs
Период, годы	300	48	300	48	48
Эрозия, т/га × год	6.4		14.5	12.0	16.0
Площадь зон эрозии, га/%	35.2/65.3		–	–	42.2/78.3
Эрозия за период, т	67350.0	10776.0	220770.3	29323.4	32409.6
Переотложение в пределах склонов, т/га × год	6.7		–	–	6.4
Площадь зон переотложения, га/%	13.0/24.1		–	–	8.6/16.0
Переотложение в пределах склонов за период, т	26190.0	4190.4	–	–	2640.0
Общий вынос материала со склонов за период, т	41160.0	6585.6	220770.3	29323.4	29769.6
Коэффициент доставки наносов, %	61		–	–	92
Аккумуляция в днищах, т/га × год	21.2 ¹	15.7 ²	21.2 ¹	15.7 ²	
Площадь днищ, га/%	3.1/5.8				
Аккумуляция в днищах за период, т	19690.0 ¹	2332.5 ²	19690.0 ¹	2332.5 ²	

¹ – Определено на основании геологических описаний разрезов в днищах.

² – Определено радиоцезиевым методом.

ся аккумуляция материала, о чем свидетельствует повышенный общий запас изотопа (4382 Бк/м²). Мощность слоя аккумуляции за цезиевый период оценивается примерно в 4–5 см (средняя скорость около 1 мм/год). При экстремальных эпизодах стока происходили локальные размывы и переотложение материала, следы которых отмечаются, например, в разрезе П-21 ниже по тальвегу. Об этом свидетельствуют пониженный примерно на 20%, по сравнению с опорным, запас изотопа (3170 Бк/м²) и наличие достаточно сильно заглубленного четкого пика концентрации на глубине 6–9 см (рис. 3в). Вывод о смене эрозии аккумуляцией подтверждается и наличием в геологическом разрезе четкой неровной эрозионной границы на глубине 17–29 см. После эпизода эрозии в данной точке наблюдалось накопление наносов, скорость которого оценивается примерно в 4–5 мм/год. Наблюдаемая здесь повышенная интенсивность аккумуляции, по всей видимости, характерна только для небольших участков днища, где происходит заполнение наносами ранее сформировавшихся местных размывов. Другая ситуация наблюдается в верхней части днища, охарактеризованной разрезом П-6 (рис. 3з). Характер глубинного распределения ¹³⁷Cs обусловлен перемешиванием почвы при распашке – таким образом, обработка периодически затрагивала верхние части днищ малых эрозионных форм. Запас изотопа, практически идентичный опорному (4002 Бк/м²), свидетельствует о геоморфологической стабильности в последние десятилетия. В среднем темпы аккумуляции в днище в последние десятилетия (около 1 мм/год, или 15.7 т/га × год) ниже определенных для всего периода освоения, что косвенно свидетельствует в пользу уменьшения эрозии на склонах. Местами наблюдались отсутствие аккумуляции и локальные размывы. Необходимо учитывать, что величина ошибки при определении темпов аккумуляции за радиоцезиевый период по эпюрам ¹³⁷Cs может достигать 50% из-за неточностей определения положения пиков. Другой причиной ошибок определений темпов аккумуляции в зоне подзолистых почв является повышенная скорость вертикальной миграции изотопа в кислой среде [23], что требует дальнейших исследований его поведения в таких условиях.

Общая характеристика исследуемой части водосбора. В целом для исследованной части водосбора характерны довольно умеренные темпы сноса материала на склонах. Диапазон величин, полученных разными методами, – 6.4–16.0 т/га × год (табл. 4). Осредненный по всей площади склонов слой денудации за весь период освоения составил, на основании почвенно-морфологического метода, примерно 50 мм, или

около 0.17 мм/год. Пространственное размещение зон эрозии и аккумуляции обуславливает неравномерное распределение этого слоя. В большинстве случаев можно выделить два участка наиболее интенсивной эрозии: в прибровочной части и в нижней трети склонов. Положение наиболее сильно деградированных почв в прибровочных частях склонов свидетельствует в пользу значительной роли перемещения пахотного горизонта почвы при обработке сельхозтехникой, поскольку энергия поверхностного стока в этой части склона еще недостаточна для осуществления интенсивной эрозионной работы. Второй же максимум связан с водной эрозией и обусловлен достижением поверхностными потоками максимальной энергии. Зоны аккумуляции в пределах склонов расположены в основном в их нижних частях в сочленениях с днищами малых эрозионных форм, а также на вогнутых перегибах и террасовидных поверхностях в пределах длинных склонов более сложной формы (тип 2, рис. 4б). В них перекладывается значительная часть (до 40%) мобилизованного материала. За счет размыва и переотложения материала бровки склонов сглаживаются, тыловые швы днищ и вогнутые перегибы склонов замываются.

Аккумуляция в днищах малых эрозионных форм характеризуется относительно низкими темпами по сравнению с наблюдаемыми в лесостепной и степной зонах Русской равнины. В целом за период интенсивного освоения территории в днищах накопилось 0.3–0.7 м наносов (1.0–2.5 мм/год). По радиоцезиевому методу отмечается некоторое ослабление темпов осадконакопления (до 1 мм/год). Оно, вероятно, отражает уменьшение поступления материала со склонов в постсоветский период из-за перехода к менее эрозионноопасным севооборотам (многолетние травы). Наряду с аккумуляцией в днищах происходили местные размывы и переотложение материала. Однако эти процессы проявлялись локально в условиях особо интенсивного стока и не оказывали существенного влияния на общий баланс наносов.

Выводы

Исследования особенностей перераспределения материала в пределах сильно распаханного водосбора Торжокской конечно-моренной гряды за период интенсивного сельскохозяйственного освоения позволяют сделать следующие выводы:

1. Незначительные темпы аккумуляции наносов в днище за весь период (1–2.5 мм/год) и последние десятилетия (1 мм/год) и отсутствие конуса выноса в устьевой части основной долины косвенно свидетельствуют о преобладании внутрисклонового перераспределения материала на водосборе. Некоторое снижение темпов аккумуляции в цезиевый период отражает уменьшение эрозионной опасности севооборотов в постсоветское время.

2. Совпадение в расположении установленных почвенно-морфологическим и радиоизотопным методом зон сноса и аккумуляции материала в пределах пахотных склонов указывает на устойчивую направленность процессов перемещения материала в течение всего периода сельскохозяйственного освоения водосбора: максимальная убыль материала отмечается в пределах прибровочных частей склонов, а накопление – в тыловых швах. Это свидетельствует о значительном вкладе механической эрозии в трансформацию рельефа склонов. Перераспределение наносов на склонах ведет к постепенному сглаживанию выпуклых и вогнутых элементов рельефа.

3. Хотя сельскохозяйственное освоение территории, имеющее длительность не менее 300 лет, и привело к относительной активизации эрозионно-аккумулятивных процессов, темпы их оставались низкими по сравнению со степной и лесостепной зонами Русской равнины. Диапазоны среднемноголетних величин денудации (смыва и механического перемещения почвы), полученные различными методами, составляют 6.4–14.5 т/га × год для всего периода интенсивного освоения и 6.4–16.0 т/га × год для последних десятилетий, хотя последнее значение, рассчитанное по радиоцезиевому методу, вероятно, является завышенным.

4. Оценка интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на исследованном водосборе, отличающемся значительной распаханностью и относительно высоким эрозионным потенциалом рельефа, за земледельческий период свидетельствует о сравнительно слабом воздействии сельскохозяйственной деятельности на рельеф других водосборов с аналогичным составом отложений (морена с поверхности). Склоны междуречий, сложенные с поверхности более податливыми к смыву покровными суглинками, перекрывающими морену, трансформируются гораздо интенсивнее [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лидов В.П. Процессы водной эрозии в зоне дерново-подзолистых почв. М.: Изд-во МГУ, 1981. 165 с.
2. Орлова В.К., Родионов В.С., Флесс А.Д. Особенности и темпы эрозии пахотных земель во время снеготаяния // Работа водных потоков. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 55–60.
3. Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др. Стационарные исследования эрозии почв в Центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1998. Вып. 11. С. 57–76.
4. Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Ажигиров А.А. Аккумулятивные (наносные) почвы как индикатор водной эрозии // География и природные ресурсы. 1990. № 3. С. 142–146.
5. Литвин Л.Ф. Факторы и интенсивность смыва почвы // Малые реки Волжского бассейна. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 64–68.
6. Калмыкова В.Г. Геоморфолого-гидрографическое районирование Калининской области // Физическая география Верхневолжья. Калинин, 1978. С. 31–47.
7. Маевский В.И. Краевые ледниковые образования Калининской области и границы оледенения // Физическая география Верхневолжья. Калинин, 1978. С. 52–61.
8. Спиридонов А.И. Геоморфология Европейской части СССР. М.: Высш. школа, 1976. 230 с.
9. Голосов В.Н. О цикличности эрозионно-аккумулятивных процессов в сельскохозяйственной зоне Русской равнины // Геоморфология. 1996. № 3. С. 43–51.
10. Покровский В. Историко-статистическое описание Тверской губернии. Тверь, 1879. 393 с.
11. Сборник статистических сведений по Тверской губернии. Новоторжский уезд. Тверское губ. Земство, 1889. Т. 22. 12 с.
12. Цветков М.А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII в. по 1914 г. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 152 с.
13. Топографический межевой атлас Тверской губернии. 1854 г. Масштаб 2 версты. ВИА, фонд ВУА, ед. хр. 49560.
14. Тупиково, Печенкина, Исакова и Кислякова деревни с пустошами кадета Петра Загряжского. 1777 г. РГАДА, фонд 1354, опись 1263, ед. хр. Т-35.
15. Кирюхина З.П., Серкова Ю.В. Вариабельность морфометрических показателей подзолистых почв и диагностика эродированности // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 12. С. 63–70.
16. Loughran R.J. The use of the environmental isotope caesium-137 for soil erosion and sedimentation studies // Trends in Hydrology. 1994. V. 1. P. 149–167.
17. Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г. Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 136 с.
18. He Q., Walling D.E. Interpreting the particle size effect in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments // J. Environ. Radiact. 1996. V. 30. P. 117–137.
19. Голосов В.Н. Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
20. Walling D.E., He Q. Improved models for estimating soil erosion rates from Cesium-137 measurements // J. of Environ. Quality. 1999. V. 28. № 2. P. 611–622.
21. Wischmeier, W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains // Agric. handbook № 282. Washington. 1965. 48 p.
22. Ларионов Г.А. Разномасштабная оценка и картографирование природной опасности эрозии почв // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 12. С. 49–62.
23. He Q., Walling D.E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils // Appl. Radiat. Isotopes. 1997. V. 48. P. 677–690.
24. Сидорчук А.Ю., Голосов В.Н. Калибровка моделей почвенной эрозии на основе изучения выпадающих из атмосферы радионуклидов // Почвоведение. 1995. № 7. С. 56–65.

RELIEF TRANSFORMATION OF THE SMALL CATCH-BASIN ON THE TORZHOK END-MORAINE RIDGE DURING PERIOD OF AGRICULTURAL DEVELOPMENT

YU. R. BELYAEV, V. R. BELYAEV, V. N. GOLOSOV, M. V. MARKELOV

S u m m a r y

Estimations of erosion-accumulation processes rate during intensive agricultural development were obtained by different methods for one of the small watersheds of secondary-glacial relief (Tverskaya region, Osuga river). Though the watershed has maximum treated area and relatively high field gradient, the average rates of erosion and accumulation are low. This helps to draw a conclusion that agriculture development has little impact on the other watersheds' relief while they have the same deposits composition (moraine on the surface).

УДК 551.435.132(282.252)

© 2004 г. А.М. КОРОТКИЙ

ТЕРРАСОВЫЕ РЯДЫ РЕЧНЫХ ДОЛИН СИХОТЭ-АЛИНЯ (УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ, ВОЗРАСТ И КОРРЕЛЯЦИЯ)

Общие условия формирования террас и придолинных уровней

В пределах Сихотэ-Алиня формирование речных террас и сопряженных с ними отложений происходило под действием различных факторов, таких как тектоника, асимметрия рельефа, изливания базальтов, климат, колебания базисов эрозии, перестройки речной сети. Сочетание взаимодействия этих факторов определило площадное распределение зон с различным строением террас (рис. 1, А–Е). Ниже дается анализ влияния основных факторов на террасообразование в речных долинах Сихотэ-Алиня.

Тектонический фактор. В пределах Сихотэ-Алиня выделяются три крупные морфоструктурные области: активного тектонического поднятия (ей отвечает среднегорье с террасированными речными долинами), переходной (“шарнирной”) зоны на побережье Японского моря и тектонического погружения [1, 2]. От главного водораздела Сихотэ-Алиня в направлении двух последних зон наблюдается погружение речных террас (рис. 1, А, Б). О нисходящем развитии или стабильном состоянии прибрежного блока, кроме того, свидетельствует отсутствие в северо-западном секторе япономорского побережья высоких морских террас [3–6]. Направленное поднятие территории, начавшееся в позднем миоцене, достигло своего максимума в раннем – среднем плейстоцене, о чем свидетельствуют высотные характеристики террасовых рядов и морфологические типы региональных террас.

Излияния базальтов. Особый тип террасовых рядов формируется в пределах базальтовых плато Сихотэ-Алиня. Общий облик террас по простиранию речных долин, дренирующих плато, соответствует хордовому типу [7], для которого характерно уменьшение высоты террас от среднего течения рек в направлении верховий и низовий водотоков. Высота древних террас в таких долинах, относимых к плиоцену, в среднем течении рек превышает 150–300 м. В истоках рек высота террас уменьшается до 15–20 м, а в нижнем течении – до 80–100 м (рис. 1, В). Такое распределение