

УДК 631.459.2

СОВРЕМЕННЫЙ ТРЕНД ЭРОЗИИ ПАХОТНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ ОБЫКНОВЕННЫХ ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ (САРАТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2018 г. А. В. Гусаров^{1, *}, А. Г. Шарифуллин¹, В. Н. Голосов^{1, 2}¹Институт экологии и природопользования, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

*e-mail: avgusarov@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.2018 г.

Изложены результаты оценки современного тренда изменений темпов смыва черноземов обыкновенных в Саратовской области. Детальные исследования проведены на малом водосборе в бассейне р. Большой Кошлышлей (бассейн р. Медведица) с использованием радиоцезиевого и почвенно-морфологического методов. Дополнительно привлечены данные многолетних гидрометеорологических наблюдений в регионе и опубликованные результаты наблюдений за стоком воды и смывом почвы на стоковых площадках НИИ сельского хозяйства Юго-Востока, результаты анализов гранулометрического и минерального составов стратоземов, сформированных в днище долины водосбора. Количественная оценка темпов аккумуляции в днище долины за два временных интервала (1963–1986 и 1986–2017 гг.), выполненная на основе датировки отложений с использованием в качестве хрономаркера изотопа ¹³⁷Cs, свидетельствует об их уменьшении, как минимум, в 4–6 раз после 1986 г., что указывает на пропорциональное сокращение темпов смыва на распахиваемых склонах водосбора. Анализ временной изменчивости стока взвешенных наносов рек региона (Медведица и Хопер) за период с 1940 г. по настоящее время позволяет прийти к аналогичному выводу в масштабе Приволжской возвышенности в пределах Саратовской области. Основной причиной снижения темпов смыва черноземов обыкновенных предполагается уменьшение стока воды со склонов в период весеннего снеготаяния, обусловленное сокращением глубины промерзания почв, произошедшим на фоне роста температур воздуха в зимнее и весеннее время. Указанное уменьшение темпов смыва в период снеготаяния не компенсировалось региональным ростом ливневого смыва в связи с некоторым увеличением интенсивности стокоформирующих дождей. При этом в той части Приволжской возвышенности в Саратовской области, где расположен исследованный водосбор, напротив, в последние десятилетия произошло уменьшение частоты выпадения ливней со слоем свыше 30 мм. Дополнительной причиной сокращения суммарных эрозионных потерь почв в региональном масштабе явилось уменьшение площадей обрабатываемых земель с конца 1980-х гг. из-за забрасывания наиболее крутосклонных участков пашни. В границах самого водосбора заметно увеличилась доля многолетних трав в севооборотах, что также привело к снижению здесь темпов эрозионной деградации чернозема обыкновенного.

Ключевые слова: чернозем обыкновенный (Haplic Chernozem (Pachic)), стратозем (Fluvisols), эрозия, наносы, цезий-137, радиоизотопный метод, талый сток, балка, малый водосбор, изменение климата, изменение землепользования, степь

DOI: 10.1134/S0032180X18120043

ВВЕДЕНИЕ

Саратовская область — один из наиболее сельскохозяйственно освоенных административных регионов европейской территории России (ЕТР). Область в 2015 г. вошла в ТОП-5 регионов России по размерам посевных площадей — 3730.9 тыс. га, или 4.7% в общей посевной площади страны [27]. Одним из следствий высокой хозяйственной освоенности земель области вы-

ступила водно-эрозионная деградация их почвенного покрова, которая, однако, является здесь, в целом, сравнительно слабой, в том числе из-за высокой противоэрозионной устойчивости местных почв. Так, по оценкам на 1995 г. средние темпы смыва в области составляли около 1.8 т/(га год), а доля эрозионно-опасных земель — 10.8% [17], что являлись самыми низкими показателями среди регионов Среднего и Нижне-

Таблица 1. Изменения площадей основных посевных культур на пахотных землях Саратовской области в 1950–2016 гг., тыс. га

Посевные культуры	Период, годы			±Δ, %
	1950–1956*	1970–1987**	1990–2016***	
Все культуры, в том числе:	3928.9 (100)	5829.9 (100)	4082.9 (100)	–30
зерновые	2901.0 (73.8)	3938.3 (67.6)	2627.1 (64.3)	–33
подсолнечник	193.6 (4.9)	286.5 (4.9)	646.3 (15.8)	+126
кукуруза	43.9 (1.1)	46.8 (0.8)	34.6 (0.9)	–26
однолетние (суданская трава (<i>Sorghum sudanense</i> L.), могар (<i>Setaria italica</i>))	215.0 (5.5)	494.9 (8.5)	149.3 (3.7)	–70
многолетние (люцерна посевная (<i>Medicago sativa</i> L.), эспарцет (<i>Onobrychis viciifolia</i>), житняк (<i>Agropyron</i>))	359.8 (9.2)	266.9 (4.6)	216.9 (5.3)	–19
Остальные культуры	215.6 (5.5)	796.5 (13.6)	408.7 (10.0)	–49

Примечание. ±Δ – относительное изменение площадей между периодами 1970–1987 гг. и 1990–2016 гг.; в скобках – доля в структуре посевов (%). * по [25, 26]; ** по [28]; *** по [24].

Площади в период 1950–1956 гг. рассчитаны за вычетом территории, входившей в 1954–1957 гг. в состав бывшей Балашовской области РСФСР.

го Поволжья (за исключением сравнительно более низменной и засушливой Астраханской области). Высокой степенью сельскохозяйственного освоения характеризуется Приволжская возвышенность в Саратовской области, где средняя продолжительность земледельческого использования черноземов составляет порядка 200–250 лет [49]. Многолетний мониторинг [21] показал, что пахотные земли Приволжской возвышенности подвергались до 1990-х гг. сравнительно активной эрозии как при снеготаянии, так и в теплое время года, в период выпадения ливневых осадков. Согласно карте эрозионно-опасных земель ЕТР [17], интенсивность смыва почв с обрабатываемых земель в саратовском секторе возвышенности, при существовавшей на тот момент системе земледелия, оценивалась от района к району от 1 до 10 т/(га год), при этом наиболее подверженными эрозии здесь являлись земли бассейнов небольших рек-притоков Волги (более 3 т/(га год)), с максимальными уклонами склонов до 15°–20°, а наименее эродируемые – земли бассейна р. Медведица (левого притока р. Дон) – до 1–3 т/(га год), с максимальными уклонами до 7°–8° [21]. Аналогичные темпы смыва (1–3 т/(га год)) отмечались в области западнее, в бассейне р. Хопер, в переходной зоне от Приволжской возвышенности к Окско-Донской низменности [17].

Последние десятилетия на большей части ЕТР характеризуются заметными гидроклиматическими изменениями [23, 30, 44, 46]. Согласно Фроловой с соавт. [29], происходила суще-

ственная деградация половодья как фазы водного режима рек, обусловленная повышением зимних температур воздуха и увеличением количества и продолжительности оттепелей, что привело к уменьшению максимальных расходов воды весеннего половодья (весеннего талого стока) при одновременном росте доли подземного стока. Деградация половодья на равнине была наиболее выраженной в бассейне р. Дон, захватывающего большую часть Приволжской возвышенности в Саратовской области. Здесь доля стока воды за половодье снизилась до 50% и менее от годовой величины, при том, что в первой половине XX в. на половодье приходилось в этом бассейне, в среднем, около 60–70% годового стока [29]. Отмеченные гидрометеорологические изменения не могли не сказаться на современных темпах эрозии в регионе. Влияние этих изменений на эрозионные процессы в бассейновых геосистемах было дополнено изменениями в землепользовании: сокращение площади пашни, особенно ошутимое в 1990-е гг. и начале 2000-х гг., прежде всего, в регионах с малоэффективным земледелием в лесных зонах и в подзоне сухой степи, смена севооборотов. В зоне степей площадь сокращения обрабатываемых земель была меньшей, чем в смежных, более влажных, природных зонах, но, тем не менее, ошутимой – в среднем до 27.5% [39]. Динамика изменения площадей обрабатываемых земель и его структуры в Саратовской области показана, в качестве примера, в табл. 1. В совокупности, согласно расчетам по эрозионным моделям [39], общие

объемы смытых почв в степной зоне равнины сократились, в среднем, на 14%.

Цель работы – оценка современного (с 1950-х гг.) тренда эрозии пахотных почв степной зоны на примере подтипа черноземов обыкновенных, полученная на основе результатов полевых исследований, выполненных на типичном малом водосборе, расположенном в бассейне р. Медведица, на западном мегасклоне Приволжской возвышенности (Саратовская область), и дополненных данными гидрометеорологического мониторинга.

ВОДОСБОР И ЕГО ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Объект исследования – водосбор верховий балки “Средняя”, расположенной на левобережье долины р. Большой Колышлей (площадь бассейна реки – 651 км², левобережный приток р. Медведица) близ д. Варыпаевка Аткарского района Саратовской области (рис. 1).

Рельеф. Водосбор имеет каплевидную форму в плане, характерную для региона. Днище балки является зоной аккумуляции и транзита смытой со склонов почвы. Длина исследуемого участка балки вместе с ложбиной в ее верховьях составляет 1850 м (общая длина от истока до выхода на пойму р. Большой Колышлей – 3030 м). Площадь изученной части водосбора балки – 0.78 км², включая часть водосбора (0.09 км²), отделенную насыпью автомобильной (бетонно-плитной) дороги (предположительно с конца 1960-х гг.) в его юго-западной части. Рельеф склонов, а также продольный профиль ложбины и днища балки и поперечные профили с точками отбора проб представлены на рис. 2. Площадь балки “Средняя” составляет 0.069 км² (в том числе днища балки – 0.01 км² со средним уклоном – 0.027 (в верховьях изученного участка – 0.019, в средней части – 0.048, в низовьях – 0.017)). Средняя абсолютная высота изученной части балочного водосбора – 235 м (амплитуда высот – 45 м), средний угол наклона его поверхности – ок. 2° (максимальный – 4.4°). Особенностью рельефа водосбора является наличие структурной (?) “ступени” в его центральной части, двух ложбин длиной 473 и 578 м, по которым концентрируется сток в левой (по отношению к балочной долине) части водосбора, а также небольшой (150 м) ложбины в его правой части.

Геологическое строение. Балка прорезает отложения среднего и позднего палеоцена (пески, алевриты, песчаники, глины, опоки и др.), перекрытые четвертичными элювиально-делювиаль-

ными суглинками и глинами, которые являются почвообразующими породами на склонах водосбора [3].

Климат региона – умеренно-континентальный с жарким летом и холодной зимой с устойчивым снежным покровом. По данным ближайшей к водосбору метеорологической станции в г. Октябрьский городок в Татищевском районе (ок. 23 км на ЮЮВ от водосбора), среднегодовая температура атмосферного воздуха за 1950–2015 гг. составила 5.1°С с тенденцией ее повышения в последние десятилетия (табл. 2). Анализ линейных трендов годовых сумм осадков (по метеостанции в г. Октябрьский городок за 1966–2016 гг. – 439 мм/год) за период 1936–2012 гг. свидетельствует о тенденции их увеличения по всем природным зонам Саратовской области [13]. При этом наибольший рост годового количества осадков наблюдался в западных районах области, где и расположен исследуемый водосбор. Годовая сумма осадков за последние 30–35 лет увеличилась, в основном, на 8–10%. Наибольший рост месячных сумм осадков по всей территории области отмечался в сентябре, январе и июне; тенденции уменьшения осадков зафиксированы повсеместно в мае и по большинству станций в августе [13]. В целом за холодный период (ноябрь–март) количество осадков в области увеличивалось, за исключением лесостепи. В теплый же период года (апрель–октябрь) в большинстве районов области количество осадков также увеличивалось, за исключением районов близ г. Саратов, где отмечалось их снижение. Так, по данным метеорологической станции в г. Октябрьский городок, была отмечена выраженная тенденция сокращения летних осадков в последние десятилетия и относительно небольшой их рост во все остальные (особенное весной) календарные сезоны года (табл. 3). Причем, если в 1950–1986 гг. на долю осадков теплого времени года в регионе (апрель–октябрь) приходилось суммарно около 67% годовых осадков, то в 1987–2016 гг. – 63%. В целом по области за теплый период года повторяемость эрозионно-опасных дождей (слоем выпадения более 30 мм) в последние десятилетия выросла в 1.3 раза по сравнению с периодом 1912–1980 гг. [16], в то время как по данным метеостанции в г. Октябрьский городок намечалась, как будет показано далее, противоположная тенденция, что показывает высокую неоднородность распределения осадков и их временной изменчивости в семиаридных ландшафтах равнины. Вместе с ростом зимних и ранневесенних температур воздуха (на фоне небольшого увеличения осадков зимнего периода) отмечался и прирост весенней (март–апрель) температуры



Рис. 1. Географическое положение изученного малого водосбора балки “Средняя” (Аткарский район Саратовской области) на ЕТР. На космическом снимке (от 27.08.2014, по данным WorldView-2): пунктирная белая (черная) линия – граница всего (изученной части) водосбора; I, II и III – почвенные (стратоземы) разрезы в днище балки; В – д. Варыпаевка; на карте: 1 – областные центры, 2 – центры административных районов Саратовской области, 3 – положение метеостанции в г. Октябрьский городок, 4 – гидрологические посты на р. Хопер (г. Балашов и х. Бесплемяновский) и р. Медведица (пгт. Лысье горы (ЛГ)), 5 – положение водосбора.

Таблица 2. Изменения усредненных по двум периодам наблюдений среднемесячных температур атмосферного воздуха на метеорологической станции в г. Октябрьский городок (Татищевский район Саратовской области) в 1950–2016 гг., °С

Период, годы	Календарный месяц года												Год
	Я	Ф	М	А	М	И	И	А	С	О	Н	Д	
1950–1986	–11.7	–11.9	–5.6	6.6	14.5	18.4	20.3	18.9	12.6	4.7	–2.6	–7.9	4.7
1987–2016	–9.5	–9.2	–3.7	6.9	17.7	19.2	21.1	19.5	13.1	5.8	–1.9	–7.1	5.7
±Δ, °С	+2.2	+2.7	+1.9	+0.3	+3.2	+0.8	+0.8	+0.6	+0.5	+1.1	+0.7	+0.8	+1.0

±Δ – изменение температуры воздуха между периодами.

Таблица 3. Изменения усредненных по двум периодам наблюдений сезонных сумм атмосферных осадков на метеорологической станции в г. Октябрьский городок (Татищевский район Саратовской области) в 1966–2016 гг., мм

Период, годы	Сезон года				Год
	зима	весна	лето	осень	
1966–1986	91.4	88.3	150.3	114.3	444.3
1987–2016	93.1	97.1	124.2	118.8	433.2
±Δ, мм (%)	+1.7 (+1.9)	+8.8 (+10.0)	–26.1 (–17.4)	+4.5 (+3.9)	–11.1 (–2.5)

±Δ – изменение (в скобках – относительное) суммы осадков между периодами.

Таблица 4. Изменения усредненных по двум периодам наблюдений температур почвы на разной глубине по данным метеорологической станции в г. Октябрьский городок (Татищевский район Саратовской области) в 1963–2011 гг., °С

Месяц (декада)	Период, годы	Глубина, см		
		160	80	20
Март (последняя)	1963–1986	0.52 (33)	–0.85 (75)	–1.03 (75)
	1987–2011	1.58 (4)	0.19 (36)	–0.31 (60)
Апрель (первая)	1963–1986	0.83 (17)	0.12 (58)	1.11 (35)
	1987–2011	1.75 (0)	0.78 (32)	1.16 (32)

Примечание. В скобках – доля (% от имеющихся данных) лет с отрицательной среднедекадной температурой почвы на данной глубине в периоде.

почв в регионе, наиболее выраженный на глубинах более 0.2 м (табл. 4).

Почвенный и растительный покровы. В ландшафтном отношении водосбор и его окрестности принадлежат Идолго-Колышлейскому району южной подзоны степной зоны Приволжской возвышенности [31]. Почвенный покров водосбора и его окрестностей представлен, преимущественно, черноземами обыкновенными (Haplic Chernozems (Loamic, Pachic)) глинистыми и тяжелосуглинистыми, сформированными на элювиально-делювиальных отложениях позднего неоплейстоцена. В днище балки водосбора формируются стратоземы (Fluvisols). Для района исследования характерно общее слабое развитие процессов эрозии, протекающих на сравнительно пологих (1°–3°) слабovol-

нистых водоразделах [3]. Растительный покров водосбора до эпохи земледельческого освоения региона был представлен разнотравными типчаково-ковыльными степями [30]. В настоящее время водосбор распахан почти на 89%; залуженные территории на нем (борта балки, ее днище, участок, примыкающий к дороге) не превышают, в сумме, 11%. На момент проведения полевых работ (третья декада июня 2017 г.) распаханые черноземы обыкновенные изученного водосбора были засеяны ячменем¹. По оценкам Иванова с соавт. [12],

¹ В Аткарском районе Саратовской области структура посевов в 2012–2016 гг. была следующая: зерновые и зернобобовые культуры (пшеница, овес, кукуруза и др.) – 53%, технические культуры и овощи (подсолнечник, рыжик, картофель) – 41%, кормовые культуры – 5%, другие культуры, пар – 1% [24].

площадь пашни в бассейне р. Медведица (выше г. Аткарск, Саратовская область), к которому принадлежит рассматриваемый водосбор, с 1985 г. по 2015 г. сократилась с 68.5 до 61.9% при увеличении лесопокрытой площади (с 13.7 до 16.5%) и площади лугов (с 15.2 до 18.8%).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки тренда изменения темпов эрозионно-аккумулятивных процессов использовался радиоцезиевый (^{137}Cs) метод, который в пределах территорий с глобальными и чернобыльскими выпадениями данного изотопа позволяет достоверно установить темпы аккумуляции наносов за разновременные интервалы [8, 40, 48]. Радиоактивный ^{137}Cs с периодом полураспада 30.2 лет широко используется для оценки современной временной динамики эрозионных и аккумулятивных процессов в бассейновых геосистемах [34, 38, 41, 43, 45, 47, 50, 51]. В пределах большей части Европы, за исключением Пиренейского полуострова, зафиксировано несколько пиков выпадения ^{137}Cs – так называемые глобальные, 1958–1959 и 1962–1964 гг. (максимум – 1963 г.), связанные с годами наиболее активных испытаний ядерного оружия в открытой атмосфере и распространенные по всему северному полушарию, и “чернобыльский” (1986 г.), обусловленный аварией на одноименной АЭС, ареал выпадения которого – преимущественно Восточная, Центральная и Северная Европа [2, 37]. Все пики с достаточно высокой точностью (± 1 –3 см) фиксируют высотное положение поверхности почвы/наносов дна долин первых порядков и других ненарушенных зон устойчивой аккумуляции на момент выпадения ^{137}Cs в эти годы [5, 33]. При этом наиболее активная вертикальная миграция цезия происходит в первые годы после выпадения изотопа из атмосферы, постепенно замедляясь во времени в 1.5–2.0 раза в зависимости от типа почвы, ее кислотности, гранулометрического состава, особенностей инфильтрации и т. д. [36, 42]. При условии сохранности указанных маркирующих ^{137}Cs -слоев в толще аккумулятивных наносов появляется возможность датировки и определения темпов седиментации за три временных интервала: 1959–1963, 1963–1986 и с 1986 г. и до момента отбора почвенных образцов. Очевидно, что темпы аккумуляции наносов, вынесенных с эрозионно-активных площадей водосбора, находятся в прямой и тесной связи с динамикой смыва и размыва почв. В то же время точный расчет изменений темпов эрозии возможен только для замкнутых водосборов (например, при наличии пруда в замыкающем створе) и при определении темпов от-

ложения и площади всех зон аккумуляции, существующих или существовавших внутри конкретного водосбора [5].

Отбору образцов, с целью определения в них удельной активности (концентрации) ^{137}Cs , в днище исследуемой балки Средняя предшествовало подробное изучение морфологии рельефа ее водосбора с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4. Данные, полученные с БПЛА, были обработаны в программном обеспечении ГИС Agisoft Photoscan и на их основе построена высокоточная цифровая модель рельефа водосбора (рис. 2). Также проведено детальное обследование балки с целью изучения ее морфологии, включая анализ уклонов днища, выделение эрозионных врезов, участков аккумуляции наносов в днище, путей транспортировки наносов с сельскохозяйственных полей и др.

По результатам проведенных обследований по длине днища балки были выбраны места заложения трех почвенных (стратоземы) разрезов глубиной 64 (разр. I), 30 (разр. II), 51 см (разр. III), характеризующих различные морфолого-динамические его участки. Малая глубина разр. II и III была обусловлена высоким стоянием грунтовых вод во время полевых работ в июне 2017 г. Проведено описание почвенных горизонтов каждого из разрезов, где далее послойно с шагом 2, 3, 5 см и с площади 10×10 и 15×15 см с помощью ручных инструментов, а также на больших глубинах с шагом 10 см с помощью почвенного пробоотборника (по 5 вертикалям в каждом разрезе, до глубины 100 см) были отобраны образцы почвы/наносов для определения в них концентрации ^{137}Cs . Также во всех трех разрезах через 5 см отобраны (с помощью пробоотборника) образцы для определения гранулометрического состава аккумулятивных наносов; в разр. I – также для определения минерального состава. На распахиваемых склонах водосбора балки “Средняя” по трем поперечным профилям, расположенным в створах заложения разрезов в днище балки, отобраны с помощью пробоотборника интегральные образцы черноземной почвы на глубине 0–30 см также для определения концентрации ^{137}Cs . В этих же точках отбора, на основе почвенно-морфологического метода, проведена оценка мощности гумусового гор. А + АВ_{ca} чернозема обыкновенного. Для определения координат точек отбора всех образцов использовался высокоточный GNSS-прибор Trimble Geoexplorer 6000.

В лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева (Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, ответственный исполнитель – М.М. Иванов) все об-

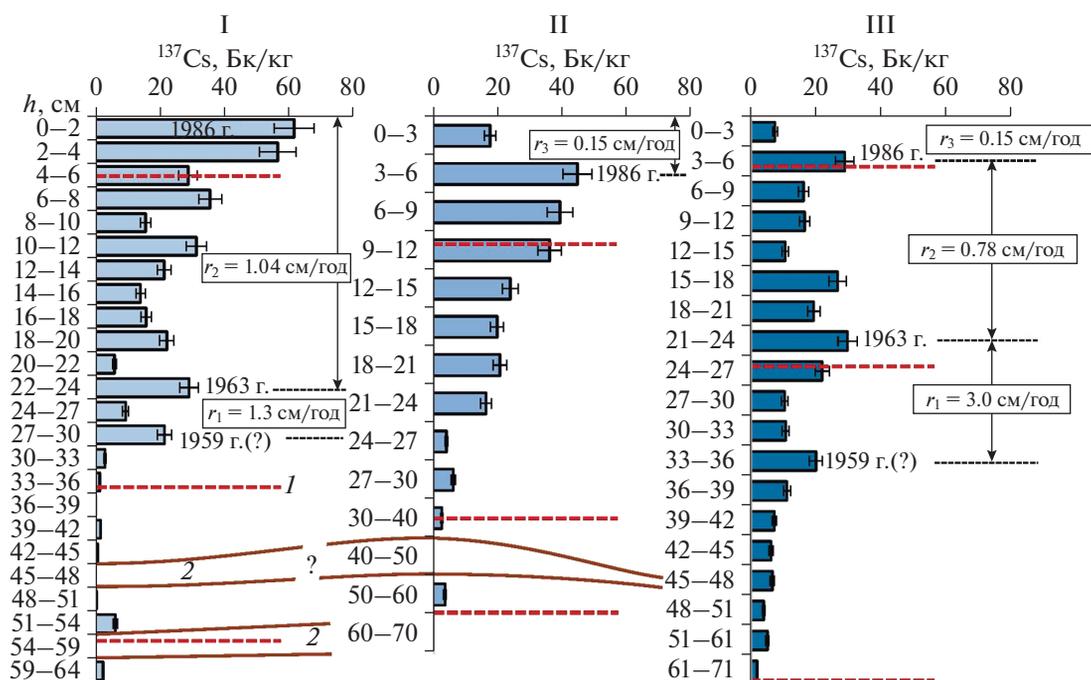


Рис. 3. Вертикальное распределение концентрации ^{137}Cs в разрезах стратоземов (I, II и III) дна балки “Средняя” (Аткарский район Саратовской области): h – глубина отбора образцов; средние скорости аккумуляции наносов за периоды: r_1 – 1959–1963 гг., r_2 – 1963–1986 гг., r_3 – 1986–2017 гг.; 1 – границы пачек наносов, выделенных по особенностям их гранулометрического состава; 2 – прослой наносов, лишенные или с малой концентрацией ^{137}Cs . Концентрация ^{137}Cs в разрезах на глубинах от 64–71 см вплоть до максимальной глубины отбора образцов близка или равна нулю, в связи с чем она не отражена на диаграммах.

разцы высушивали, дезагрегировали и пропускали через сито диаметром 2 мм. Измерения удельной активности ^{137}Cs проводились с погрешностью 5–10% на гамма-спектрометре СКС-07(09) П-Г-Р фирмы ООО НИИП “Грин Стар Инструментс”. В лаборатории “Экологические инновации” (Институт экологии и природопользования, ответственный исполнитель – И.Б. Выборнова) и в литологической лаборатории (Института геологии и нефтегазовых технологий, ответственный исполнитель – А.А. Ескин) ФГАОУ ВО “Казанский (Приволжский) федеральный университет” определялся соответственно гранулометрический (анализатор Microtrac Bluewave S3500) и минеральный (дифрактометр XRD-700 (Shimadzu)) состав образцов.

Дополнительно собраны и обработаны данные наблюдений за рядом основных метеорологических параметров (температура воздуха, атмосферные осадки, запасы воды в снеге, температура почвы на разных глубинах) за 1950–2016 гг. по ближайшей метеорологической станции в г. Октябрьский городок и г. Аткарск (материалы свободного электронного доступа Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, ВНИИГМИ–МЦД), а

также материалы наблюдений за расходами воды и взвешенных наносов р. Медведица (за 1940–2015 гг.) на гидрологическом посту у пгт. Лысье горы (Саратовская область), бассейн которой включает изученный малый водосбор балки “Средняя”, и р. Хопер (за 1940–2015 гг.), речная сеть которой дренирует западную часть Приволжской возвышенности в Саратовской области, на гидрологических постах у г. Балашов (Саратовская область) и хут. Бесплемяновский (Волгоградская область). Проанализированы космические снимки высокого разрешения Landsat (архив снимков Геологической служба США) с 1972 по 2014 гг. для выявления возможных изменений площади пашни и структуры высеваемых культур на исследуемом водосборе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разрезах стратоземов дна исследуемой части балки пики ^{137}Cs черномыльского происхождения, характеризующие положение поверхности почвы/наносов на 1986 г., располагаются либо у поверхности (разр. I), либо на небольшой глубине относительно нее (рис. 3). Пики ^{137}Cs , характеризующие поверхность почвы на 1963 г. и распо-

ложенные на глубинах 21–24 см, сохранились лишь в разр. I и III, хотя и, возможно, частично перемыты. В разр. II пик 1963 г. не может быть выделен, так как был, по всей видимости, размыт, учитывая, что разрез расположен на участке днища с относительно большим уклоном при пересечении структурной (?) “ступени”. Судя по наличию небольшого уступа в современном продольном профиле днища балки именно на этом его участке формировались неглубокие вторичные врезы. На основании расположения пиков 1963 и 1986 гг. в разр. I и III можно говорить о существенном (как минимум в 4–5 раз в пересчете на мощность отложений) уменьшении скоростей аккумуляции наносов в днище балки после 1986 г. по сравнению с периодом 1963–1986 гг., при том, что в разр. I после 1986 г. не накопились наносы вовсе (как результирующая их потенциального накопления и размыва). В разр. III, с учетом разницы средних плотностей разновременных толщ наносов, темпы аккумуляции в пересчете на удельную массу составляли 7.5 кг/(м² год) в 1963–1986 гг. (средняя плотность 962 кг/м³) и 1.17 кг/(м² год) в 1986–2017 гг. (726 кг/м³), то есть они сократились в 6.4 раза. Глубинное положение сохранившихся в разр. I и III также предполагаемых пиков ¹³⁷Cs 1959 г. выпадения по отношению к пикам ¹³⁷Cs 1963 г. указывает на более высокие (почти в 4 раза) темпы аккумуляции смытых с пахотных склонов наносов (почвенного материала) в интервале 1959–1963 гг. по сравнению с периодом 1963–1986 гг. Иными словами, как минимум с конца 1950-х гг., отмечался общий устойчивый тренд ослабления темпов аккумуляции наносов, из которых формировались стратоземы днища балки изученного водосбора. После 1986 г., судя по мощности накопившихся наносов, смыв почвы на водосборе мог практически отсутствовать большую часть этого периода, так как 3–5 см наносов, отложившихся в разр. II и III, теоретически могли накопиться всего лишь несколько случаев смыва.

Наличие прослоев наносов, лишенных ¹³⁷Cs, в разр. I и II позволяет предположить, что они могли быть сформированы при аккумуляции продуктов линейной эрозии (ныне заросшие промоины?), вскрывшей практически бесцезиевые делювиальные суглинистые отложения, подстилающие черноземные почвы на водосборе (в том числе бортах?) балки.

В гранулометрическом составе вскрытых разрезов наносов (стратоземов) днища балки отмечается общая тенденция увеличения доли глинистой фракции и уменьшения доли песка вниз по профилю, что отразилось в общем “огрубении” размеров минеральных зерен в верхних слоях раз-

резов (рис. 4). Отчасти это может быть связано с процессами почвообразования в увлажненном днище балки, что способствует вертикальной миграции наиболее тонких минеральных частиц. Однако сохранность пика ¹³⁷Cs 1986 г. в разр. I на поверхности почвы свидетельствует о том, что эта миграция не столь активна. В противном случае пик ¹³⁷Cs 1986 г. мог бы сместиться до глубины 3–5 см, как это наблюдается, к примеру, в Скандинавии [32]. Различия в гранулометрическом составе наиболее выражены в самом верхнем разрезе балочного стратозема (разр. I). Повышенное содержание песчаных частиц возможно связано, отчасти, и со случаем интенсивного смыва, который наблюдался на водосборе при выпадении ливня в 54 мм в 1985 г. В случае значительного ливневого стока в зонах аккумуляции отлагаются, прежде всего, частицы более крупных (песчаных) фракций, так как при разрушении почвенных агрегатов в процессе их транспортировки потоком более активно перемещаются частицы тонких фракций [35]. Визуальный анализ вертикального распределения гранулометрических показателей позволил выделить в толще стратозема серии разновозрастных пачек наносов (рис. 4, табл. 5), характеризующихся определенными ландшафтными и климатическими условиями их накопления. Достаточно однородный минеральный состав стратозема по глубине (табл. 6) указывает на то, что источники наносов, поступающих в днище, не изменялись во времени, и, следовательно, сооружение насыпной дороги не повлияло на эрозионные процессы, но, очевидно, привело к снижению максимального стока воды из-за некоторого сокращения площади водосбора. Важно отметить, что площадь пашни на водосборе за период с 1960 гг. изменилась только в связи с сооружением дорожной насыпи.

Анализ пространственного распределения мощности гумусового гор. А + АВ_{са} чернозема обыкновенного и интегральной концентрации в нем ¹³⁷Cs (в первых 30 см от поверхности) в пределах водосбора балки (рис. 2) дает основание выделить участки, различающиеся темпами агрогенной почвенной эрозии. Так, наилучшая сохранность гумусового горизонта с мощностью, близкой к естественной, отмечается в юго-западной части водосбора, вплотную примыкающей с востока к автомобильной дороге. Здесь же отмечается и наибольшая концентрация ¹³⁷Cs, что свойственно ненарушенному или слабо размытому почвенному профилю чернозема, с повышенной концентрацией изотопа именно в его верхней части. Относительно узкая полоса неэродированных почв фиксируется, хотя и с некоторыми раз-

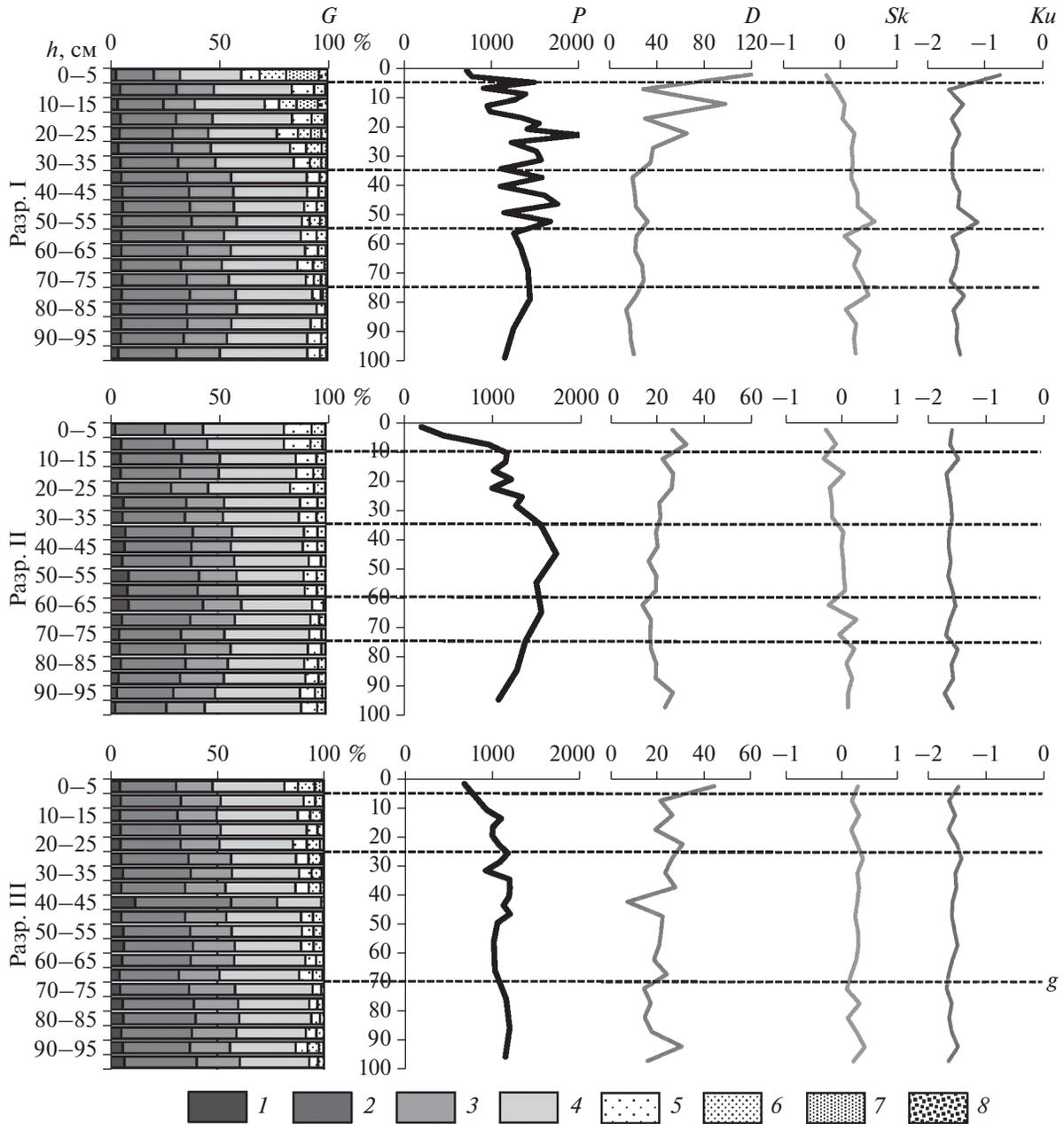


Рис. 4. Вертикальное распределение гранулометрического состава (G) и ряда его количественных характеристик (D – средний диаметр минеральных зерен (мкм), Sk – асимметрия, Ku – эксцесс распределения), плотностей (P , $\text{кг}/\text{м}^3$) наносов, формирующих стратоземы разрезов I, II и III днища балки Средняя (Аткарский район Саратовской области): h – глубина отбора образцов; g – границы пачек наносов; гранулометрический состав: глина: 1 – мелкозернистая (0.2–1 мкм), 2 – крупнозернистая (1–5 мкм); алеврит: 3 – мелкозернистый (5–10 мкм), 4 – крупнозернистый (10–50 мкм); песок: 5 – тонкозернистый (50–100 мкм), 6 – мелкозернистый (100–250 мкм), 7 – среднезернистый (250–500 мкм), 8 – суммарно крупно- и грубозернистый (500–2000 мкм).

рывами, также вдоль водораздела с соседним (к востоку) водосбором. Оба участка расположены в частях водосбора, где существуют естественные или искусственные ограничения поверхностного стока: в первом случае – вследствие наличия насыпи автомобильной дороги, во втором – близостью к водораздельной линии, что обуславливает

меньшую естественную концентрацию стока. Оба этих участка – арена развития преимущественно процессов капельно-дождевой деструкции почвенного покрова.

Судя по мощности гумусового горизонта чернозема, темпы смыва на остальной части пахотных склонов водосбора балки оказываются несколько

Таблица 5. Изменения усредненных величин плотности (P) и некоторых гранулометрических характеристик (рис. 4) по выделяемым пачкам наносов (стратозема) в разрезах днища балки Средняя (Аткарский район Саратовской области)

Глубина, см	P , кг/м ³	Гранулометрический состав и его характеристики			
		глина/алеврит/песок (в том числе КГП*), %	D , мкм	Sk	Ku
Разр. I					
0–5	758	20.0/40.3/39.7 (3.86)	120.7	–0.25	–0.74
5–35	1349	28.9/51.6/19.5 (1.29)	49.0	0.12	–1.53
35–55	1487	36.6/53.2/10.2 (0.10)	23.9	0.35	–1.40
55–75	1347	34.2/54.3/11.5 (0.11)	25.3	0.26	–1.53
75–100	1293	34.3/58.1/7.6 (0.02)	18.6	0.28	–1.46
Разр. II					
0–10	558	27.6/53.0/19.4 (0)	29.9	–0.16	–1.58
10–35	1188	32.9/53.4/13.7 (0)	23.9	–0.14	–1.57
35–60	1613	39.2/51.1/9.7 (0)	19.4	0.06	–1.60
60–75	1488	37.8/55.2/7.0 (0)	16.3	0.03	–1.59
75–100	1263	31.6/58.2/10.2 (0)	21.6	0.18	–1.56
Разр. III					
0–5	725	30.7/50.8/18.5 (0.55)	44.6	0.29	–1.46
5–25	995	32.5/56.4/11.1 (0.03)	24.6	0.24	–1.57
25–70*	1110	36.3/52.5/11.2 (0.00)	23.3	0.28	–1.52
70–100	1170	38.6/53.6/7.8 (0.04)	18.5	0.24	–1.60

* КГП – крупно- и грубозернистый песок (500–2000 мкм); D – средний диаметр минеральных зерен, мкм; Sk – асимметрия, Ku – эксцесс распределения.

Таблица 6. Минеральный состав наносов (стратозема) в разр. I (рис. 2) днища балки Средняя (Аткарский район Саратовской области)

Глубина пачки наносов, см*	0–5	5–35	35–55	55–75	75–100
Глубина отбора образца в пачке, см	0–5	20–25	40–45	60–65	85–90
Минеральный состав, %:					
кварц	66	61	63	63	64
монтмориллонит	21	26	20	16	16
альбит	5	8	9	8	9
микроклин	4	3	6	8	6
хлорит	4	2	2	2	2
мусковит	0	0	0	3	3
Итого	100	100	100	100	100

* См. рис. 4.

выше, и, с учетом порядка 200–250-летней распашки почв данного региона [49], составляют, исходя из сокращения мощности гор. А + АВ_{са}, примерно на 10 см, порядка 4–5 т/га в год. Причем, если исходить из относительно однотипного распределения цезия с глубиной для черноземов

водосбора, предполагающего постепенное сокращение радиоизотопа в нижних горизонтах, то наибольший современный срез (эрозионная денудация) профиля чернозема будет отмечаться в нижней (северной) части водосбора (предположительная мощность гумусового горизонта –

около 50 см). Именно здесь фиксируется, в целом, и низкая концентрация изотопа (менее 10 Бк/кг). На большей (средней) части водосбора содержание ^{137}Cs выше (10–14 Бк/кг), что, при прочих равных условиях, указывает на меньший смыв чернозема (средняя мощность гумусового гор. А + АВ_{са} – около 55–60 см). Впрочем, нельзя исключать, что ^{137}Cs чернобыльского происхождения выпал на водосборе неравномерно, так как его поступление из атмосферы было связано с выпадением лишь нескольких дождей. Некоторое усиление темпов смыва в направлении севера обусловлено особенностями рельефа водосбора – его общей северной покатости. Небольшие ареалы относительного усиления (т. 3.2) и ослабления (т. 3.3, 4.2) смыва почв на поперечных профилях связаны с локальными особенностями топографии на этих участках.

Смыв почв на юго-западном участке водосбора, расположенном к западу от автомобильной дороги, проложенной, как было сказано ранее, в конце 1960-х гг., не оказал сколь-либо значительного влияния на отмеченную современную (с конца 1950-х гг.) тенденцию сокращения темпов аккумуляции его продуктов в днище балки. В этой связи полевые исследования в его пределах нами не проводились.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о значительном (как минимум в 4–6 раз) уменьшении в последние десятилетия темпов аккумуляции наносов в днище долины изученного малого водосбора. Следовательно, можно предположить, с известной степенью условности, пропорциональное этому уменьшению на водосборе темпов смыва чернозема обыкновенного, материал которого являлся основным источником данных наносов. Учитывая физико-географические условия на водосборе, к отмеченной тенденции темпов почвенного смыва могли привести как изменения климата, так и изменения в землепользовании.

Изменение климата. Отмеченный ранее многолетний положительный тренд температуры воздуха в регионе, особенно в зимние месяцы и в мае, повлиял на формирование поверхностного стока и смыва в период снеготаяния. По данным ближайших к водосбору метеорологических станций в г. Октябрьский городок и г. Аткарск, как минимум с середины 1960-х гг. происходило слабовыраженное увеличение запасов воды в снежном покрове в марте – месяце, предшествующем снеготаянию в области (рис. 5). К сожалению, в нашем распоряжении имелись надежные (без многолетних пропусков) данные лишь по первой

декаде марта, но, учитывая, сравнительно высокую корреляцию величин запасов воды в снеге между декадами месяца одного и того же года наблюдения, можно более или менее уверенно говорить о сохранности на протяжении всего марта выявленной положительной перводекадной тенденции изменения запасов воды в снеге. Одновременно в регионе в этот же период отмечался рост температуры почвы, что способствовало уменьшению глубины ее промерзания в конце холодного времени года.

Температурный режим и глубина промерзания почв оказывают существенное влияние на развитие эрозионных процессов в период таяния снега весной. Этот вывод согласуется со сформулированным Барабановым [4] правилом лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод, по которому при некотором (лимитирующем) значении одного из факторов (глубины промерзания, температуры воздуха или запасов воды в снеге) сток не формируется вне зависимости от значения иных факторов. При глубине промерзания больше критической объем весеннего стока на пахотных склонах будет определяться конкретными гидрометеорологическими условиями в период снеготаяния. Следовательно, уменьшение глубины промерзания почв явилось тем основным климатическим изменением, благодаря которому, через механизм перераспределения поверхностного и подземного стока воды, темпы смыва и размыва черноземных почв в период снеготаяния в регионе, где расположен исследуемый водосбор, заметно сократились. Это согласуется с результатами наблюдений на стоковых площадках НИИ сельского хозяйства Юго-Востока: ежегодный поверхностный сток в период снеготаяния с пашни и уплотненной зяби в 1973–1982 гг. составлял, соответственно, 10 и 34.5 мм, и сократился к периоду 2004–2014 гг. до 1.3 и 9.1 мм [20]. Данная закономерность прослеживалась и в многолетних изменениях стока воды р. Медведица, в бассейне которой расположен анализируемый водосбор. Так, с 1940 г. здесь отмечена выраженная тенденция уменьшения интенсивности стока воды в период снеготаяния (половодья), что особенно сказалось в сокращении (более чем вдвое) максимальных расходов воды в реке, а также доли половодного стока в годовом речном стоке (табл. 7). Синхронно отмечался прирост речного стока в зимнюю и летнюю межень, связанный с ростом доли подземного стока в период зимних оттепелей и весеннего снеготаяния². Сокращение

² Увеличение меженного стока воды в реке вряд ли можно объяснить, в целом, ростом количества атмосферных осадков в ее бассейне. Для летних осадков отмечено даже их общее сокращение за последние 50 лет.

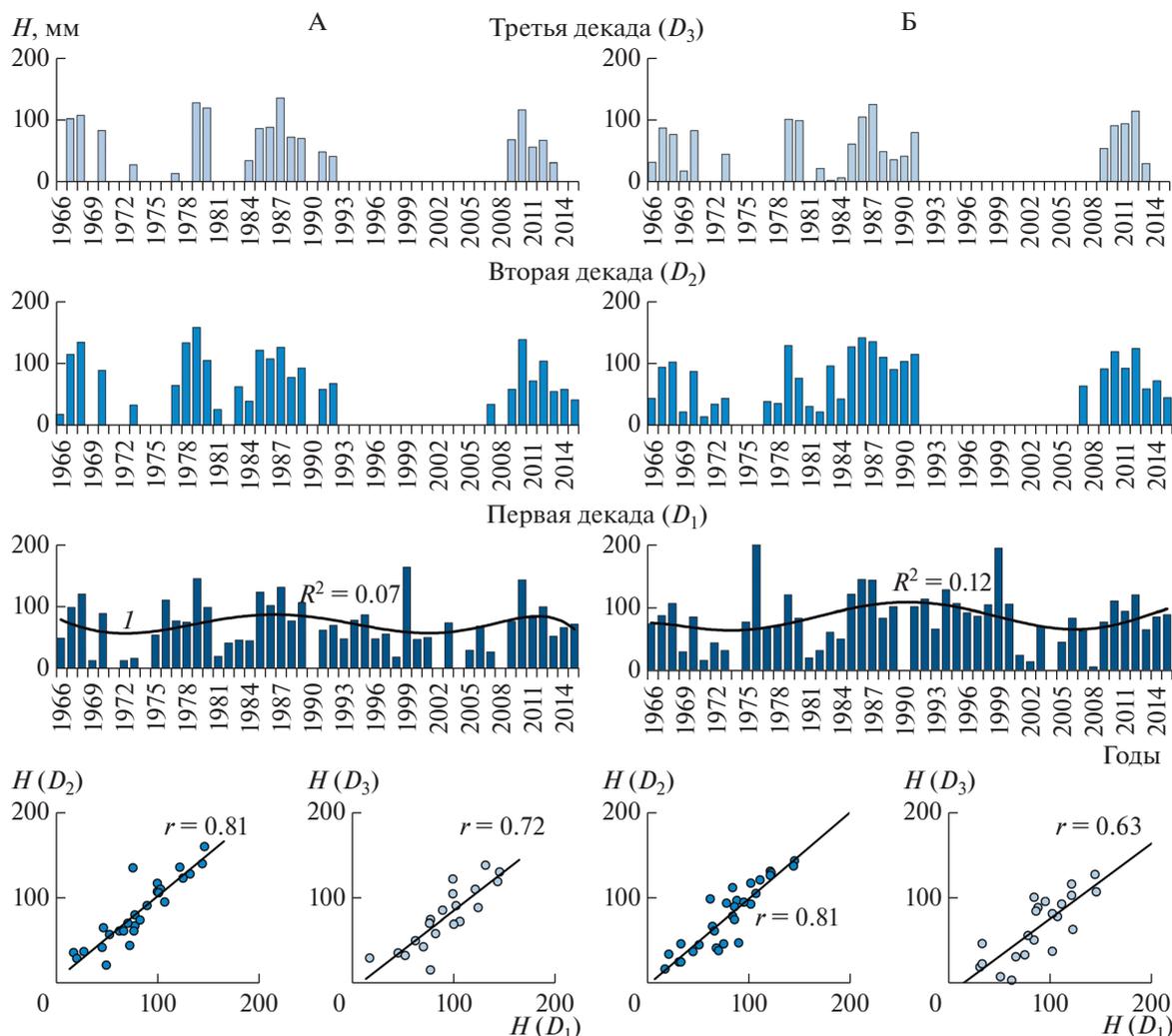


Рис. 5. Многолетняя изменчивость запасов воды в снеге (H) по трем декадам марта в 1966–2015 гг. на метеорологических станциях в г. Октябрьский городок (А) и г. Атқарск (Б) Саратовской области: I – полиномиальный тренд шестой степени с коэффициентом его аппроксимации (R^2); r – коэффициент линейной корреляции. Средняя многолетняя величина H за первую декаду марта по метеостанции в г. Октябрьский городок: в 1966–1986 гг. – 71.5 ± 18.5 мм, в 1987–2015 гг. – 74.4 ± 13.6 мм ($\Delta = +4.1\%$); по метеостанции в г. Атқарск – соответственно 76.9 ± 20.0 и 88.7 ± 14.7 мм ($\Delta = +15.3\%$).

поверхностного стока в период снеготаяния, согласно данным наблюдений на стоковых площадках НИИСХ Юго-Востока, привело к уменьшению темпов смыва в 6.2 раза [20], что, в целом, согласуется с выявленным в результате наших исследований снижением скоростей аккумуляции наносов в днище долины малого водосбора балки Средняя.

На фоне указанных изменений стока воды в регионе отмечен отчетливый тренд снижения стока взвешенных наносов, доминирующая часть которых формировалась за счет продуктов почвенно-овражной эрозии [9, 11]. Максимум эрозии в бассейне р. Медведица, судя по динамике изменений стока наносов, приходился на 1960–

1970 гг. Причины этого будут рассмотрены ниже. Аналогичная картина изменения стока воды наблюдалась также в соседнем, расположенном к западу, бассейне р. Хопер (табл. 8), подтверждая их широкий региональный характер.

Современное гидролого-климатическое ослабление среднегодовых темпов эрозии черноземов обыкновенных частично было связано и с многолетними изменениями осадков теплого времени года, и, прежде всего, наиболее эрозионно-опасных осадков (со слоем выпадения более 30 мм), которые в исследованной (западной) части Приволжской возвышенности, согласно данным наблюдений на близлежащей метеостанции в г. Октябрьский городок, уменьшились не только

Таблица 7. Попериодная изменчивость стока воды (Q) и стока взвешенных наносов (W) р. Медведица у пгт. Лысье горы Саратовской области ($F = 7610 \text{ км}^2$) в 1940–2015 гг.

Характеристики Q и W	Период наблюдений		
	1940–1960 гг.	1961–1984 гг.	1985–2015 гг.
Средний годовой слой стока воды, мм	82.0 ± 15.2*	72.9 ± 10.8	87.2 ± 8.3
Средняя дата начала половодья	31 марта	24 марта	21 марта**
Средний суммарный слой стока за половодье, мм	58.5 ± 13.6	47.5 ± 10.1	44.9 ± 6.8**
Средний наибольший срочный Q за половодье (Q_{\max}), м ³ /с	455.3 ± 112.7	291.0 ± 66.6	224.5 ± 44.5
Средняя дата наибольшего срочного Q за половодье	12 апреля	7 апреля	5 апреля**
Средняя продолжительность половодья, сутки	35 ± 3	37 ± 3	46 ± 6**
Средняя интенсивность половодного стока, мм/сут	1.7	1.3	1.0**
Годы с наибольшей интенсивностью половодного стока (в скобках – мм/сут)	1942 (2.8), 1946 (2.6), 1948 (3.0), 1957 (2.7)	1961 (2.6), 1970 (2.7)	1994 (2.7), 2003 (2.4)
Средняя доля половодного Q в годовом стоке, %	67.0 ± 5.9	61.1 ± 5.2	48.1 ± 4.8**
Годы с долей половодного стока 70% и более (в скобках – % от общего количества лет в периоде)	1940, 1941, 1942, 1946, 1947, 1948, 1949, 1951, 1953, 1956, 1957 (52%)	1961, 1963, 1964, 1965, 1977, 1979 (25%)	Отсутствуют (0%)**
Годы с долей половодного стока 50% и менее (в скобках – % от общего количества лет в периоде)	1943, 1945, 1954 (14%)	1966, 1967, 1969, 1972, 1976, 1984 (25%)	1989, 1990, 1992, 1993, 1995, 1999, 2000, 2001, 2002, 2005, 2007 (47%)**
Средний наименьший Q за период открытого русла (Q_{\min}), м ³ /с	3.2 ± 0.6	3.0 ± 0.6	7.1 ± 0.6
Средний наименьший Q за зимний период, м ³ /с	2.9 ± 0.4	3.9 ± 0.8	9.1 ± 0.8
Q_{\max}/Q_{\min}	141.8	97.7	31.6
Средний годовой W , кг/с	1.73 ± 0.61***	3.61 ± 1.55****	1.03 ± 0.53*****
Годы с аномально большим для данной реки средним годовым W (≥ 3 кг/с)	1946, 1953	1963, 1964, 1965, 1968, 1970, 1973	–
Годы с аномально малым для данной реки средним годовым W (≤ 0.5 кг/с)	1943, 1945, 1954	1969	2008, 2014, 2015

* Здесь и далее доверительный интервал при $P = 0.95$; ** за 1985–2007 гг.; *** за 1938–1941, 1943, 1945, 1946, 1949–1954 гг.; **** за 1963–1975 гг.; ***** за 2008–2015 гг.

Примечание. Выделение трех периодов основано на анализе хода полиномиального тренда – кривой шестой степени по среднегодовому стоку воды реки ($R^2 = 0.11$).

Таблица 8. Попериодная изменчивость стока воды (Q) и стока взвешенных наносов (W) р. Хопер у г. Балашов Саратовской области ($F = 14300 \text{ км}^2$) в 1940–2015 гг.

Характеристики Q и W	Период наблюдений		
	1940–1966 гг.	1967–1993 гг.	1994–2015 гг.
Средний годовой слой стока воды, мм	107.4 ± 16.6	84.8 ± 11.8	116.0 ± 15.7
Средняя дата начала половодья	31 марта	25 марта	19 марта*
Средний суммарный слой стока за половодье, мм	82.1 ± 15.5	53.8 ± 11.6	69.3 ± 11.1*
Средний наибольший срочный Q за половодье (Q_{\max}), м ³ /с	929.0 ± 200.9	441.0 ± 119.3	394.2 ± 92.1
Средняя дата наибольшего срочного Q за половодье	19 апреля	16 апреля	15 апреля*
Средняя продолжительность половодья, сутки	44 ± 3	50 ± 5	65 ± 10*
Средняя интенсивность половодного стока, мм/сут	1.9	1.1	1.1*
Годы с наибольшей интенсивностью половодного стока (в скобках – мм/сут)	1941 (3.0), 1948 (3.5), 1955 (3.0), 1957 (2.5), 1963 (3.1)	1968 (2.4), 1970 (2.3), 1977 (2.7), 1979 (2.6)	1994 (2.8)*
Средняя доля половодного Q в годовом стоке, %	74.3 ± 4.3	58.5 ± 4.4	55.9 ± 3.0*
Годы с долей половодного стока 70% и более (в скобках – % от общего количества лет в периоде)	1940–1942, 1945–1949, 1951, 1953, 1955–1957, 1959–1961, 1963–1965 (76%)	1968, 1970, 1977, 1979, 1981, 1988 (21%)	Отсутствуют (0%)*
Годы с долей половодного стока 50% и менее (в скобках – % от общего количества лет в периоде)	1954 (4%)	1969, 1976, 1978, 1984, 1989, 1990, 1992 (25%)	2007 (7%)*
Средний наименьший Q за период открытого русла (Q_{\min}), м ³ /с	5.4 ± 0.7	10.1 ± 1.1	18.7 ± 1.7
Средний наименьший Q за зимний период, м ³ /с	7.2 ± 0.8	12.1 ± 1.6	20.2 ± 2.3
Q_{\max} / Q_{\min}	172.0	43.7	21.1
Средний годовой W , кг/с	4.3 ± 1.1**	2.7 ± 1.2***	0.8 ± 0.5****
Годы с аномально большим для данной реки средним годовым W (≥ 6 кг/с)	1941, 1942, 1951, 1955, 1957, 1961, 1963, 1964	–	–
Годы с аномально малым для данной реки средним годовым W (≤ 1 кг/с)	1954	1967, 1969	2008, 2009, 2011, 2014, 2015

* За 1994–2007 гг.; ** за 1939, 1941, 1942, 1944, 1947, 1950–1966 гг.; *** за 1967–1975 гг.; **** за 2008–2015 гг.
Примечание. Выделение трех периодов основано на анализе хода полиномиального тренда – кривой шестой степени по среднегодовому стоку воды реки ($R^2 = 0.15$).

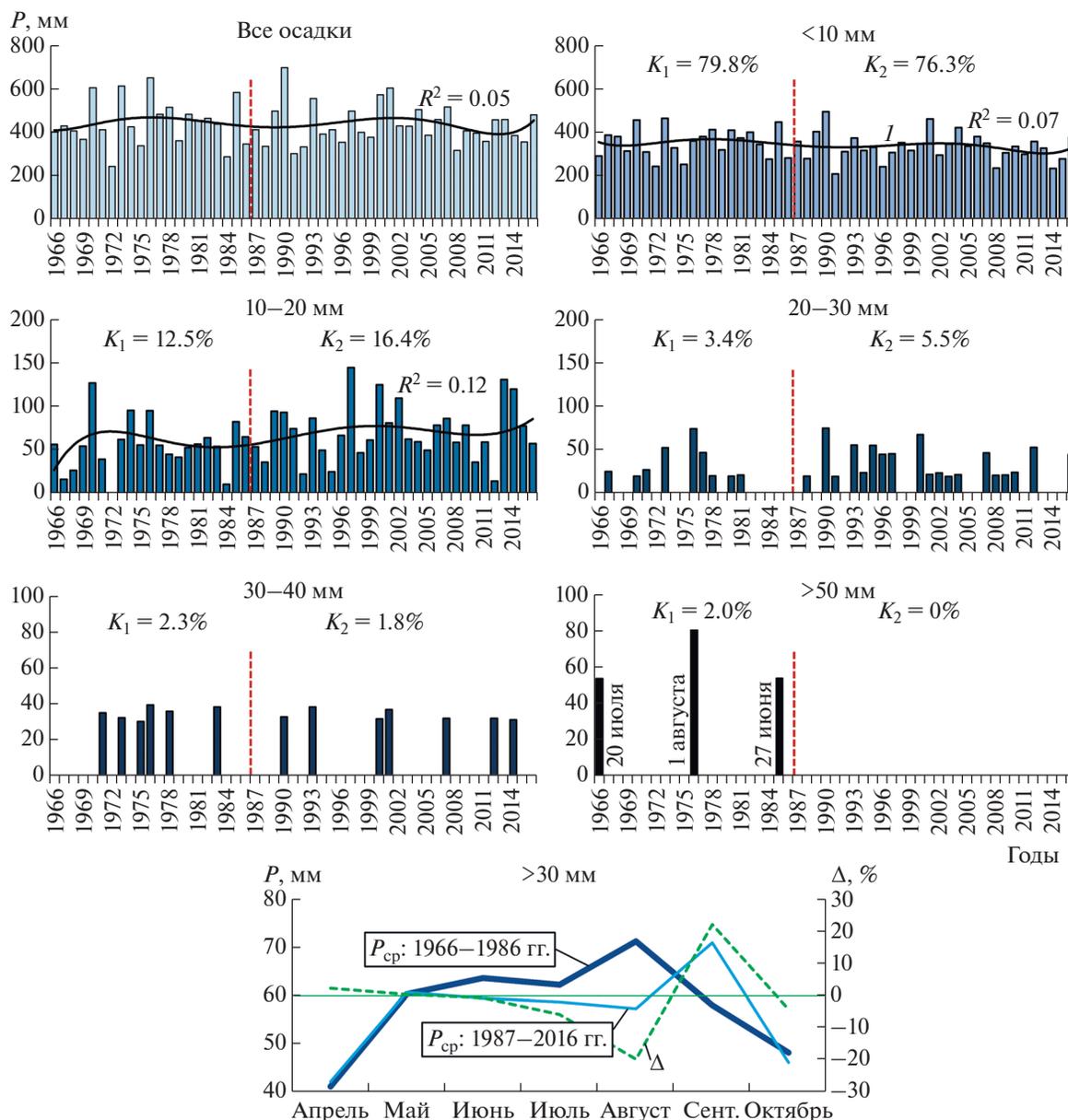


Рис. 6. Многолетняя изменчивость количества атмосферных осадков теплого времени года (апрель–октябрь) с разными слоями выпадения (P) в период 1966–2016 гг. по данным метеорологической станции в г. Октябрьский городок (Саратовская область): I – полиномиальный тренд шестой степени с коэффициентом его аппроксимации (R^2); K_1 и K_2 – усредненная доля осадков данного слоя выпадения в среднем годовом их количестве соответственно в 1966–1986 и 1987–2016 гг.; P_{cp} – усредненная за соответствующий период месячная сумма атмосферных осадков ≥ 30 мм; $\pm\Delta$ – относительное изменение P_{cp} между периодами. Распределение количества осадков по слоям выпадения следующее:

Слой выпадения, мм	Периоды наблюдений			
	1966–1986 гг.		1987–2016 гг.	
	P , мм/10 лет	I , мм/ед.	P , мм/10 лет ($\pm\Delta$, %)	I , мм/ед. ($\pm\Delta$, %)
<10	3532	1.5	3320 (–6.0)	1.9 (+26.7)
10–20	555	13.4	718 (+29.4)	13.5 (+0.7)
20–30	148	24.0	237 (+60.1)	23.7 (–1.3)
30–40	100	35.1	78 (–22.0)	33.5 (–4.6)
40–50			Не наблюдались	
>50	89	62.6	0 (–100.0)	0.0 (–100.0)

I – усредненный слой осадков за одно дождевое событие; $\pm\Delta$ – изменение показателя по отношению к 1966–1986 гг.

количественно, но и в своей удельной интенсивности (рис. 6). Несколько иная ситуация в отношении частоты выпадения стокоформирующих осадков наблюдалась на восточном мегасклоне центра Приволжской возвышенности, где отмечался некоторый рост числа таких дождей при одновременном увеличении темпов смыва [20]. Но, при этом, рост ливневого смыва был зафиксирован, в основном, на стоковых площадках, находящихся под паром, тогда как доля паров в севооборотах составляет здесь не более 10%. Более того, подавляющее большинство стокоформирующих ливней выпадает в летние месяцы, когда почва, в зависимости от структуры посевов, в той или иной мере защищена культурной растительностью³. Следовательно, несмотря на пространственную вариабельность ливневых событий, их вклад в суммарные потери почвы за весь рассматриваемый период был существенно ниже.

Изменение землепользования. Влияние хозяйственной деятельности на снижение темпов эрозии почв можно рассматривать в региональном (бассейновом) и локальном (в границах водосбора) масштабах. Отмеченный ранее резкий прирост стока взвешенных наносов в бассейне р. Медведица в 1963–1975 гг. был обусловлен не аномальным стоком воды в этот период. Он-то, как раз, был наименьшим в эти годы. Во второй половине 1960-х гг.–первой половине 1970-х гг. в области происходил планомерный процесс механизации сельского хозяйства, ставший одним из существенных факторов интенсификации аграрного производства в данный период и последующие годы. С 1966 г. по 1974 г. количество тракторов в области увеличилось почти на 24%, комбайнов – на 33% [22]. С 1970-х гг. стали поступать более совершенные в те годы тракторы (Т-4, Т-50, Т-53, Т-38М и др.). Техника колхозов и совхозов области пополнилась более производительными скоростными жатками, модернизированными самоходными комбайнами СК-4, целыми комплексами зерновых погрузочных машин и пр. Саратовская область стала пионером внедрения новых мощных тракторов К-700: только в 1965–1970 гг. сюда было поставлено 2456 “Кировцев” [22]. В

области эти тяжелые тракторы использовались почти на всех видах полевых работ. Причем свыше 50% сельскохозяйственных перевозок приходилось именно на долю К-700. В результате к началу 1970-х гг. почти полностью был механизирован процесс производства зерна в совхозах области. Все эти процессы привели, скорее всего, к активизации агрогенной почвенной эрозии на полях региона через изменения ряда физических свойств почв (прежде всего ее переуплотнение). В результате этого усилился общий смыв и размыв почвы, что и способствовало росту доли продуктов бассейновой эрозии в реках региона. Влияние указанных антропогенных изменений наглядно показано на рис. 7, А, где на графике связи среднегодовых расходов взвешенных наносов с годовым слоем стока воды р. Медведица в период до 1975 г. четко выделяются два сценария (две кривые) развития эрозионных процессов в ее бассейне: годы относительно ослабленной эрозии (преимущественно военные и послевоенные) – 1941, 1945, 1946, 1951, 1954 гг. и др., и годы относительно активной эрозии – преимущественно 1960–1970 гг. Так, в последний период выделяются годы, характеризующиеся особенно высокими (относительно “нормального” функционирования, описываемого степенной кривой связи) величинами стока наносов (темпами эрозии): 1973 (+124.8%), 1972 (+67.7%), 1970 (+40.3%), 1965 (+15.4%), 1964 гг. (+11.5%) и др. Косвенно на антропогенное влияние на увеличение стока наносов реки указывает возросший в 1960-е и начале 1970-х гг. удельный их показатель η – величина модуля стока наносов относительно единицы модуля стока воды в бассейне реки (рис. 7, В)⁴. В то же время история взаимодействия антропогенного и гидрометеорологического факторов в каждый конкретный год периода отличалась спецификой, что демонстрируют, например, 1969 и 1973 гг. с близкими (малыми) величинами запасов воды в снеге в начале марта. Если 1969 г. в бас-

³ По данным анализа космических снимков территории, включающей исследованный водосбор, здесь до начала 1990-х гг. урожай убирали в начале, середине августа. Именно в этот месяц (до 1986 г.) усредненная месячная сумма атмосферных осадков ≥ 30 мм была наибольшей в году и имела тенденцию наиболее выраженного сокращения. Это обстоятельство могло способствовать дополнительному (к весеннему) снижению темпов смыва почвы. С начала 1990-х гг. уборка урожая уже осуществлялась в начале сентября – в месяце, когда отмечался значительный рост этих осадков. Это обстоятельство, напротив, могло способствовать некоторому усилению смыва почв здесь в осеннее время.

⁴ Высокие, в целом, величины η р. Медведица по сравнению с р. Хопер говорят о более сильной агрогенной эрозии почв в бассейне первой реки, несмотря на положение обоих бассейнов в практически сходных климатических условиях, при том, что средняя многолетняя величина годового слоя стока воды в бассейне р. Медведица была даже ниже, чем в бассейне р. Хопер. Большему стоку наносов р. Медведица (12.6 т/(км² год) в 1950–1975 гг., 4.3 т/(км² год) в 2008–2015 гг.) способствует также сложение поверхности ее бассейна в левобережной части преимущественно лучше эродируемыми лессовыми отложениями позднего плиоцена, в то время как поверхности его правобережной части, а также бассейна р. Хопер (6–8 т/(км² год) в 1950–1975 гг., 1.3–1.8 т/(км² год) в 2008–2015 гг.) представлены преимущественно сравнительно хуже эродируемыми суглинисто-супесчаными отложениями раннего эоплейстоцена [14].

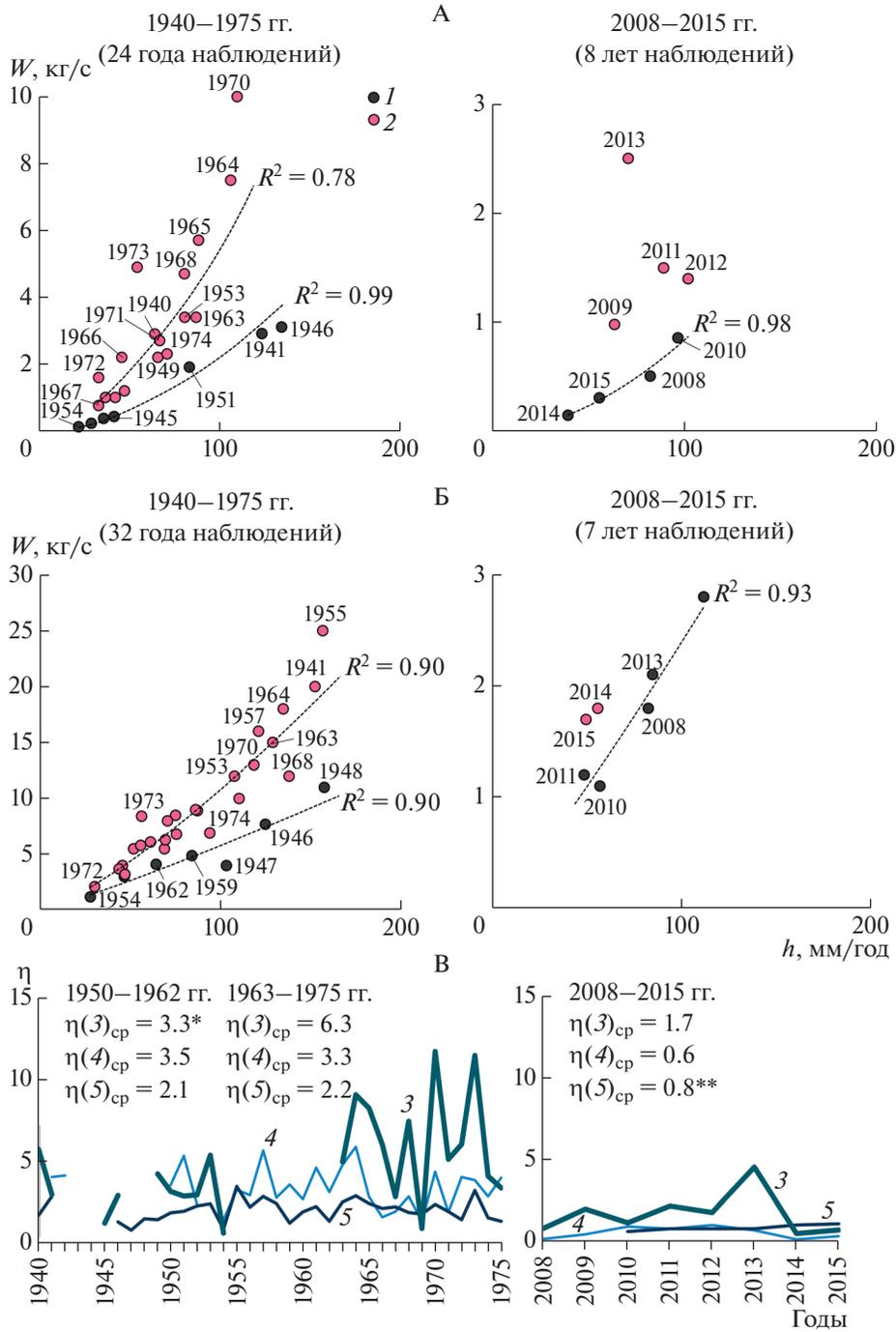


Рис. 7. Попериодная изменчивость связи среднегодовых расходов взвешенных наносов (W) р. Медведица у пгт. Лысье горы Саратовской области ($F=7610 \text{ км}^2$) (А) и р. Хопер у хут. Бесплемяновский Волгоградской области ($F=44900 \text{ км}^2$) (Б) с годовым слоем стока воды (h) в их бассейнах в 1940–2015 гг.: 1 (2) – годы относительного ослабления (активизации) эрозии в речном бассейне; R^2 – коэффициент аппроксимации линии степенного тренда; 1940, 1941... – годы наблюдений; η – отношение среднегодового модуля стока взвешенных наносов (W) к модулю стока воды (Q) реки – удельный модуль W ($(\text{т}/(\text{км}^2 \text{ год}))/(\text{л}/(\text{с км}^2))$) (В); $\eta(3)_{\text{ср}}$, $\eta(4)_{\text{ср}}$ и $\eta(5)_{\text{ср}}$ – усредненные за периоды величины η соответственно рек Медведица – 3 (у пгт. Лысье горы), Хопер – 4 (у г. Балашов), Хопер – 5 (у хут. Бесплемяновский). * за 1949–1954 гг.; ** отсутствуют данные за 2009 г. На графиках (А) и (Б) отсутствуют данные за следующие годы: р. Медведица – 1942, 1944, 1947, 1948, 1955–1962, р. Хопер – 1942–1945, 2009 г.; относительно низкие величины η р. Хопер у хут. Бесплемяновский (В) частично могут объясняться в 3–6 раз большей площадью ее бассейна.

сейне реки характеризовался, как и полагается, малой долей половодного стока и аномально низкими величинами продуктов почвенной эрозии в реках, то в 1973 г., напротив, при средней доле половодного стока отмечалась аномально сильная эрозия почв в бассейне р. Медведица, судя по величинам стока наносов. В последнем случае она, частично, могла быть связана также с выпадением в этот год эрозионно-опасных для черноземов атмосферных осадков (≥ 30 мм) в теплое время года.

Такими же повышенными величинами взвешенных наносов отличались 1960–1970 гг. в бассейне р. Хопер выше хут. Бесплемяновский, дренирующей всю западную часть Саратовской области и северо-запад Волгоградской области (рис. 1, рис. 7, Б). Однако, в отличие от р. Медведица, средние величины η в 1960–1970-е гг. не претерпели принципиальных изменений по отношению к 1950-м гг. (рис. 7, В). Это указывает, скорее всего, на меньшую, в целом, роль хозяйственной деятельности в многолетней динамике наносов в бассейне р. Хопер выше хут. Бесплемяновский. Годовой сток взвешенных наносов р. Хопер также имел, в целом, выраженную тенденцию уменьшения в последние десятилетия: в среднем 9.32 ± 2.43 кг/с в 1940–1941, 1946–1966 гг., 6.80 ± 2.48 кг/с в 1967–1975 гг., и 1.79 ± 0.37 кг/с в 2008, 2010–2015 гг. При этом интенсивность половодного стока (талого стока) в ее бассейне снизилась почти вдвое: 1.1 мм/сут в 1940–1966 гг., 0.7 мм/сут в 1967–1993 гг., и 0.6 мм/сут в 1994–2008 гг. (более поздними данными мы не располагаем). На постепенное уменьшение талого стока (его эрозионной роли) с 1940–1970-х гг. прямо указывает огрубение снизу вверх гранулометрического состава наносов, вскрытых в разрезах стратоземов днища балки. Именно при талом смыве, вследствие оттаивания почвы, почвенные агрегаты разрушаются практически на месте еще до воздействия на них склонового стока, и благодаря этому во взвеси переносятся более тонкие фракции при любой интенсивности стока. Фактически, данный тренд снижения стока взвешенных наносов в последние десятилетия полностью согласуется с масштабным сокращением скорости аккумуляции в днище балки исследованного водосбора.

В последние десятилетия в Саратовской области происходило сокращение площадей обрабатываемых земель. Так, в бассейне р. Медведица (выше г. Аткарск), как отмечалось выше, их площадь в 2015 г. уменьшилась почти на 10% по сравнению с 1985 г. преимущественно за счет вывода из состава пашни наиболее эрозионно-опасных участков склонов [12]. Это обстоятельство стало еще одной причиной современного снижения

массы наносов, включая продукты эрозии черноземов, в бассейне реки, хотя на фоне общего снижения отмечались годы (2010-е гг.) с относительной активизацией смыва почв. Значительно меньшие удельные показатели модуля стока наносов (η) рек в 2008–2015 гг. по отношению к периоду 1950–1975 гг. также косвенно указывают на ведущую роль антропогенного фактора в этом снижении.

Что же касается изменений землепользования непосредственно в границах изученного малого водосбора, то, по данным снимков высокого разрешения Landsat, прослеживалась следующая его временная динамика: в период 1972–2001 гг. на водосборе высевались различные культуры (преимущественно яровые), а в 2002–2014 гг. здесь (так же как в смежных малых водосборах) увеличилась роль посевов многолетних трав, существенно предохраняющих, согласно данным наблюдений на стоковых площадках [20], черноземы обыкновенные от смыва, и, следовательно, явившиеся дополнительным фактором общего современного уменьшения интенсивности водной эрозии на склонах данной геосистемы.

Свой вклад в снижение массы продуктов почвенно-овражной эрозии в речном стоке взвешенных наносов могли потенциально внести противоэрозионные мероприятия, проводимые в степной зоне с конца 1970-х гг., а также сооружение прудов в речных системах области. Эта информация нами не анализировалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Количественная оценка изменений темпов аккумуляции наносов в днище балки типичного малого водосбора центральной части Приволжской возвышенности в Саратовской области в сочетании с анализом динамики стока воды и взвешенных наносов рек, дренирующих данный регион, свидетельствуют о значительном сокращении в последние 30 лет эрозионной деградации чернозема обыкновенного на пахотных землях. Основной причиной выявленного, как минимум 4–6-кратного, снижения темпов смыва на пашне явилось резкое уменьшение поверхностного стока воды со склонов в период весеннего таяния снега. Это уменьшение было обусловлено повышением температуры воздуха в зимние и весенние месяцы, которые способствовали сокращению глубины промерзания почв в период снеготаяния. Полученные результаты хорошо согласуются с данными мониторинговых наблюдений за стоком воды и наносов на стоковых площадках, расположенных на восточном мегасклоне Приволжской возвышенности. Выявленные разнонаправленные

изменения повторяемости и интенсивности стокоформирующих ливней теплого времени года играли второстепенную роль, не оказав принципиального влияния на общее сокращение темпов смыва в регионе. Роль антропогенного фактора в уменьшении эрозионной деградации черноземов в границах исследованного водосбора проявилась в увеличении доли многолетних трав в структуре севооборотов. В целом в пределах области в последние 25 лет произошло сокращение доли пашни, занятой многолетними и однолетними травами, за счет, частично, роста площадей посевов подсолнечника. Дополнительным фактором снижения суммарных эрозионных потерь почв в региональном масштабе явилось как минимум 10%-ное сокращение площадей обрабатываемых земель с 1985 г. из-за забрасывания наиболее крутосклонных участков пашни.

Тенденции уменьшения талого стока, среднегодовых темпов эрозии и аккумуляции ее продуктов прослеживались в последние десятилетия практически по всей лесостепи, а также в северной и восточной частях степной ландшафтной зоны Восточно-Европейской равнины [1, 6–8, 10, 15, 19, 39]. Они являлись, скорее всего, представительными для всей черноземной зоны ЕТР.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 15-17-20006. Авторы признательны аспирантам Казанского (Приволжского) федерального университета А.З. Сатдарову, А.М. Гафурову и Р.А. Медведевой за помощь в проведении полевых работ летом 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апухтин А.В., Кумани М.В.* Современные изменения условий формирования слоя стока весеннего половодья рек Курской области // Уч. зап.: Электронный научный журнал Курского гос. ун-та. 2012. № 1. С. 300–311.
2. Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины / Под ред. Ю.А. Израэля. М.: ИГКЭ Росгидромета. Роскартография, 1998. 144 с.
3. Атлас Саратовской области / Под ред. М.А. Шабонова. М.: ГУГК, 1978. 31 с.
4. *Барабанов А.Т.* Агролесомелиорация в почвозащитном земледелии. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1993. 156 с.
5. *Голосов В.Н.* Количественная оценка перераспределения наносов в верхних звеньях флювиальной сети: достижения и проблемы // Геоморфология. 2008. № 3. С. 29–36.
6. *Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Шамшурин Е.Р.* Особенности перераспределения наносов на малом водосборе за различные периоды его сельскохозяйственного освоения (водосбор Грачёва ло-
щина, Курская область) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 25–35. doi 10.15356/0435-4281-2012-1-25-35
7. *Голосов В.Н., Геннадиев А.Н., Олсон К.Р., Маркелов М.В., Жидкин А.П., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г.* Пространственно-временные особенности развития почвенно-эрозионных процессов в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2011. № 7. С. 861–869.
8. *Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Гусаров А.В., Шарифуллин А.Г.* Оценка тренда деградации пахотных почв на основе изучения темпов формирования стратоземов с использованием ¹³⁷Cs в качестве хрономаркера // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1238–1252. doi 10.7868/S0032180X17100033
9. *Гусаров А.В.* Основные закономерности соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах Северной Евразии // Геоморфология. 2015. № 4. С. 3–20. doi 10.15356/0435-4281-2015-4-3-20
10. *Гусаров А.В., Голосов В.Н., Шарифуллин А.Г., Гафуров А.М.* Современный тренд эрозии пахотных черноземов южных на западе Оренбургской области // Почвоведение. 2018. № 5. С. 601–616. doi 10.7868/S0032180X1805009X
11. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 264 с.
12. *Иванов М.А., Прищепов А.В., Голосов В.Н., Зяляев Р.Р., Ефимов К.В., Кондратьева А.А., Киняшова А.Д., Ионова Ю.К.* Изменения площади пахотных угодий в бассейнах рек Европейской территории России за период 1985–2015 гг. как фактор динамики эрозии почв // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 149–157. doi 10.21046/2070-7401-2017-14-6-149-157
13. *Иванова Г.Ф., Левицкая Н.Г.* Изменение годовой структуры осадков и водного режима почв в Саратовской области // Изв. Саратов. ун-та. Нов. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 15. Вып. 1. С. 11–15.
14. Карта четвертичных образований масштаба 1 : 2500000 территории Российской Федерации / Гл. ред. О.В. Петров, А.Ф. Морозов и др. М., СПб: Минприроды России, Роснедра, ФГПУ “ВСЕГЕИ”, ФГПУ “ВНИИОкеангеология”, 2010. 220 с.
15. *Комиссаров М.А., Габбасова И.М.* Эрозия почв при снеготаянии на пологих склонах в Южном Приуралье // Почвоведение. 2014. № 6. С. 734–743. doi 10.7868/S0032180X14060057
16. *Левицкая Н.Г., Демакина И.И., Верин А.Ю.* Оценка динамики атмосферных осадков на территории Саратовской области // Почвозащитное земледелие в России. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 45-летию Всероссийского НИИ земледелия и защиты почв от эрозии (Курск, сентябрь 2015 г.). 2015. С. 184–188.
17. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.

18. Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г. География динамики земледельческой эрозии почв на Европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400. doi 10.7868/S0032180X17110089
19. Маркелов М.В., Голосов В.Н., Беляев В.Р. Изменение скорости аккумуляции наносов на поймах малых рек в центре Русской равнины // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 5. С. 70–76.
20. Медведев И.Ф., Левицкая Н.Г., Макаров В.З., Назаров В.А. Активность эрозионных процессов на черноземах Поволжья // Аграрный научный журнал. 2016. № 8. С. 29–34.
21. Медведев И.Ф., Шабает А.И. Эрозионные процессы на пашне Приволжской возвышенности // Почвоведение. 1991. № 11. С. 61–69.
22. Нечепорук Э.Ю. Механизация сельского хозяйства Саратовской области в период интенсификации аграрного производства: 1965–1975 годы // Вестник Челябинского государственного университета. 2013. № 6(297). С. 82–86.
23. Попова В.В., Полякова И.А. Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лед и Снег. 2013. № 2(122). С. 29–39. doi 10.15356/2076-6734-2013-2-29-39
24. Посевные площади сельскохозяйственных культур. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]: <https://fedstat.ru/> (дата обращения: 12.12.2017).
25. Посевные площади СССР: Статистический сборник. М.: Государственное статистическое издательство, 1957. Т. 1. 514 с.
26. Посевные площади СССР: Статистический сборник. М.: Государственное статистическое издательство, 1957. Т. 2. 502 с.
27. Сельское хозяйство Саратовской области. Экспертно-аналитический центр агробизнеса “АБ-Центр” [Электронный ресурс]: (<http://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-saratovskoy-oblasti/>) (дата обращения: 15.11.2017).
28. Сельское хозяйство СССР: Статистический сборник. Госкомстат СССР. М: Финансы и статистика, 1988. 535 с.
29. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Павлишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20.
30. Шамакин А.Б., Попова В.В. Динамика климатических экстремумов в Северной Евразии в конце XX века // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2006. № 2. С. 157–166.
31. Эколого-ресурсный атлас Саратовской области / Под ред. В.С. Белова и Г.И. Худякова. Комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов Саратовской области. Саратов: Роскартография, 1996. 15 с.
32. Almgren S., Isaksson M. Vertical migration studies of ¹³⁷Cs from nuclear weapons fallout and the Chernobyl accident // J. Environ. Radioact. 2006. V. 91. P. 90–102. doi 10.1016/j.jenvrad.2006.08.008
33. Appleby P.G. Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review // Holocene. 2008. V. 18. P. 83–93. doi 10.1177/0959683607085598
34. Benmansour M., Mabit L., Nouira A., Moussadek R., Bouksirate H., Duchemin M., Benkdad A. Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} // J. Environ. Radioact. 2013. V. 115. P. 97–106. doi 10.1016/j.jenvrad.2012.07.013
35. Beuselink L., Steegen A., Govers G., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt // Geomorphology. 2000. V. 32. P. 69–82. doi 10.1016/S0169-555X(99)00068-9
36. Buraeva E.A., Bezuglova O.S., Stasov V.V., Nefedov V.S., Dergacheva E.V., Goncharenko A.A., Martynenko S.V., Goncharova L.Y., Gorbov S.N., Malyshevsky V.S., Varduny T.V. Features of ¹³⁷Cs distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia // Geoderma. 2015. V. 259–260. P. 259–270. doi 10.1016/j.geoderma.2015.06.014
37. Cort M.De, Dubois G., Fridman Sh.D., Germenchuk M.G., Izrael Yu.A., Janssens A., Jones A.R., Kelly G.N., Kvan-sikova E.V., Matveenko I.I., Nazarov I.M., Pokumeiko Yu.M., Sitak V.A., Stukin E.D., Tabachny L.Ya., Tsaturov Yu.S. Avdyushin S.I. The Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident. Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1998. 64 p.
38. Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V. Application of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia // Hydrol. Process. 2013. V. 27. P. 781–794. doi 10.1002/hyp.9470
39. Golosov V., Gusarov A., Litvin L., Yermolaev O., Chizhikova N., Safina G., Kiryukhina Z. Evaluation of soil erosion rates in the southern half of the Russian Plain: methodology and initial results // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2017. V. 375. P. 23–27. doi 10.5194/piahs-375-23-2017
40. Golosov V.N., Walling D.E., Konoplev A.V., Ivanov M.M., Sharifullin A.G. Application of bomb- and Chernobyl-derived radiocaesium for reconstructing changes in erosion rates and sediment fluxes from croplands in areas of European Russia with different levels of Chernobyl fallout // J. Environ. Radioact. 2018. Jun. 186. P. 78–89. doi 10.1016/j.jenvrad.2017.06.022
41. Jweda J., Baskaran M. Interconnected riverine-lacustrine systems as sedimentary repositories: Case study in southeast Michigan using ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs-based sediment accumulation and mixing models // J. Great Lakes Res. 2011. V. 37. № 3. P. 432–446. doi 10.1016/j.jglr.2011.04.010

42. *Kirchner G., Strebl F., Bossew P., Ehlken S., Gerzabek M.H.* Vertical migration of radionuclides in undisturbed grassland soils // *J. Environ. Radioact.* 2009. V. 100. P. 716–720. doi 10.1016/j.jenvrad.2008.10.010
43. *Mabit L., Benmansour M., Walling D.E.* Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation // *J. Environ. Radioact.* 2008. V. 99. P. 1799–1807. doi 10.1016/j.jenvrad.2008.08.009
44. *Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T.R.* Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe // *J. Hydrol.* 2014. V. 519. P. 3634–3650. doi 10.1016/j.jhydrol.2014.11.003
45. *Owens P.N., Walling D.E., Shanahan J., Foster I.D.L.* The use of caesium-137 measurements to establish a sediment budget for the Start catchment, Devon, UK // *Hydrol. Sci. J.* 1997. V. 42. P. 405–423. doi 10.1080/02626669709492037
46. *Park H., Sherstiukov A.B., Fedorov A.N., Polyakov I.V., Walsh J. E.* An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9. P. 064026. doi 10.1088/1748-9326/9/6/064026
47. *Porto P., Walling D.E., Alewell C., Callegari G., Mabit L., Mallimo N., Meusburger K., Zehringer M.* Use of a ^{137}Cs re-sampling technique to investigate temporal changes in soil erosion and sediment mobilisation for a small forested catchment in Southern Italy // *J. Environ. Radioact.* 2014. V. 138. P. 137–148. doi 10.1016/j.jenvrad.2014.08.007
48. *Porto P., Walling D.E., La Spada C., Callegari C.* Validating the use of ^{137}Cs measurements to derive the slope component of the sediment budget of a small rangeland catchment in Southern Italy // *Land Degrad. Dev.* 2016. V. 27. P. 798–810. doi 10.1002/ldr.2388
49. *Sidorchuk A.Y., Golosov V.N.* Erosion and sedimentation on the Russian plain, II: The history of erosion and sedimentation during the period of intensive agriculture // *Hydrol. Process.* 2003. V. 17. P. 3347–3358. doi 10.1002/hyp.1391
50. *Walling D.E., Collins A.L., Jones P.A., Leeks G.J.L., Old G.* Establishing fine-grained sediment budgets for the Pang and Lambourn LOCAR catchments, UK // *J. Hydrol.* 2006. V. 330. P. 126–141. doi 10.1016/j.jhydrol.2006.04.015
51. *Zapata F.* Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002. 219 p.