

УДК 551.4.042

В.Н. Голосов^{1,2,3}, М.В. Куманин⁴, Н.Н. Иванова⁵, В.Р. Беляев⁶, Е.Н. Шамшурина⁷**ЗАИЛЕНИЕ МАЛОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И УРБАНИЗАЦИИ ВОДОСБОРА (ПОПОВСКИЙ ПРУД, Г. КУРСК)**

Детальные исследования по оценке темпов эрозионно-аккумулятивных процессов и выявления долевого вклада различных источников наносов проведены на водосборе ныне осушенного пруда Поповский, расположенного на северной окраине г. Курска. Темпы аккумуляции наносов в отложениях пруда и балок были определены за два временных интервала с использованием в качестве маркера ¹³⁷Cs Чернобыльского и глобального происхождения. Впервые в России для оценки соотношения вклада различных источников наносов в качестве трассеров использованы жирные кислоты. Установлено, что 97–98% наносов, накопившихся в днище пруда, поступили туда с водосбора в период 1964–1986 гг., а слой сноса с площади бассейна составил 1,7 мм/год. После 1986 г. и до момента осушения пруда в 2010 г. сток наносов с водосбора пруда был минимальным. Его резкое сокращение обусловлено повышением температуры воздуха в зимние месяцы в период после 1986 г., что привело к снижению глубины промерзания почвы и практически полному прекращению стока и смыва в период весеннего снеготаяния. Дополнительным, но менее значимым фактором, стало изменение характера землепользования на водосборе с существенным сокращением пахотных земель и ростом застройки территории, особенно с конца 1990-х гг. Установлено, что основным источником заиления пруда стали наносы, поступившие в него за счет смыва и размыва на пахотных землях. Их доля составляет 50% от общего объема наносов, накопившихся в пруду. Не менее 18% донных отложений сформировались за счет развития оврагов. При этом, вероятно, фактический вклад овражной эрозии может быть выше. Это связано с тем, что, используя в качестве трассеров жирные кислоты, нельзя достоверно отделить наносы, сформировавшиеся за счет размыва оврагов, расположенных под лесом и на границе леса с яблоневым садом, от наносов, образованных за счет смыва почв в саду и в лесу, потому что они характеризуются одинаковым набором жирных кислот.

Ключевые слова: темпы эрозионно-аккумулятивных процессов, источники наносов, методика «отпечатков пальцев» (fingerprinting), изотоп ¹³⁷Cs, жирные кислоты

Введение. Деградация почв в условиях равнин умеренного климатического пояса в основном обусловлена антропогенным воздействием, тогда как в природных ландшафтах сохраняются зональные типы почв. Малые водоемы, расположенные в верхних звеньях флювиальной сети, задерживают поступающие с их водосбора наносы и транспортируемые с ними загрязняющие вещества. Изучение темпов накопления донных отложений и их химического состава позволяет реконструировать динамику стока наносов за период существования водоема [Loska, Wiechula, 2003; Small et al., 2003]. На Европейской территории России надежным маркером, позволяющим определить темпы аккумуляции за последние 60–65 лет, является техногенный изотоп цезия-137 (далее ¹³⁷Cs) глобального и Чернобыльского происхождения [Belyaev et al., 2013]. Для территорий с комплексным землепользованием, изменяющимся во времени, важной задачей является

определение долевого вклада различных источников наносов в заиление водоема, что позволяет идентифицировать основные наносопоставляющие площади водосборного бассейна [Minella et al., 2008]. Эта информация может быть использована для разработки эффективных мер по снижению как темпов эрозионных процессов на конкретных участках водосборов, так и поступления смытого материала в водные объекты. Соотношение объемов наносов, поступающих из различных источников, определяется на основе комплексной методики «отпечатков пальцев» (fingerprinting technique), которая позволяет при помощи наборов трассеров, характерных для каждого потенциального источника, рассчитать их вклад в состав донных отложений или взвешенных наносов [Голосов, 1988; Poulenard et al., 2012; Walling, 2013; Chalov et al., 2017].

В последние годы для выявления долевого вклада различных источников в сток наносов рек и за-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, докт. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: golossov@gmail.com

² Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии, глав. науч. с.

³ Казанский федеральный университет, Институт физики, НИЛ Космоэкология, глав. науч. с.

⁴ Курский государственный университет, естественно-географический факультет, кафедра географии, докт. сельск.-хоз. н., профессор, e-mail: kumanim@yandex.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., ст. науч. с.; e-mail: nadine_iv@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: vladimir.r.belyaev@gmail.com

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. биол. н., мл. науч. с.; e-mail: shamshyr@mail.ru

илиние водоемов в качестве трассеров стали использоваться жирные кислоты [Mead et al., 2005; Benowitz et al., 2006]. Жирные кислоты распространены повсеместно в почве, поступая в нее из корневых экссудатов, наземной биомассы растений и в результате деятельности микроорганизмов [Badri, Vivanco, 2009; Фарходов и др., 2019; Розенцвет и др., 2019]. Благодаря своей гидрофильности, жирные кислоты частично растворимы в воде и при поступлении в почву вступают в ассоциации с глинистыми минералами, тем самым маркируя их [Williams et al., 2006]. В дальнейшем они переносятся поверхностным стоком совместно с глинистыми минералами. Важным критерием для выбора длинноцепочечных жирных кислот в качестве трассеров для оценки эрозии является их индивидуальное изотопное соотношение $\delta^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, которое не изменяется со временем [Blessing et al., 2008].

В данной статье проведена оценка динамики и долевого вклада основных источников заиления Поповского пруда, расположенного на окраине г. Курс-

ка, на основе использования набора методов, включая применение жирных кислот и ^{137}Cs в качестве трассеров.

Объект исследования. Пруд Поповский и его водосбор расположены в границах Курска на его северной окраине ($51^{\circ}46'\text{N}$, $36^{\circ}09'\text{E}$) (рис. 1). Он входит в каскад прудов, созданных в верховьях р. Кур в 1964 г., при постройке которых возводились фильтрационные дамбы. Поскольку нет документальных свидетельств о случаях прорыва плотин каскада, можно утверждать, что отложения, накопившиеся на дне пруда за период его эксплуатации, сформировались исключительно на его водосборе площадью $3,86 \text{ км}^2$. За все время существования пруд ни разу не чистился от наносов, а в 2010 г. был спущен. С этого момента бывшая акватория пруда площадью $0,206 \text{ км}^2$ является сушей, осваиваемой наземной растительностью.

Сток воды и наносов с правобережной части водосбора поступает в пруд в основном по днищам

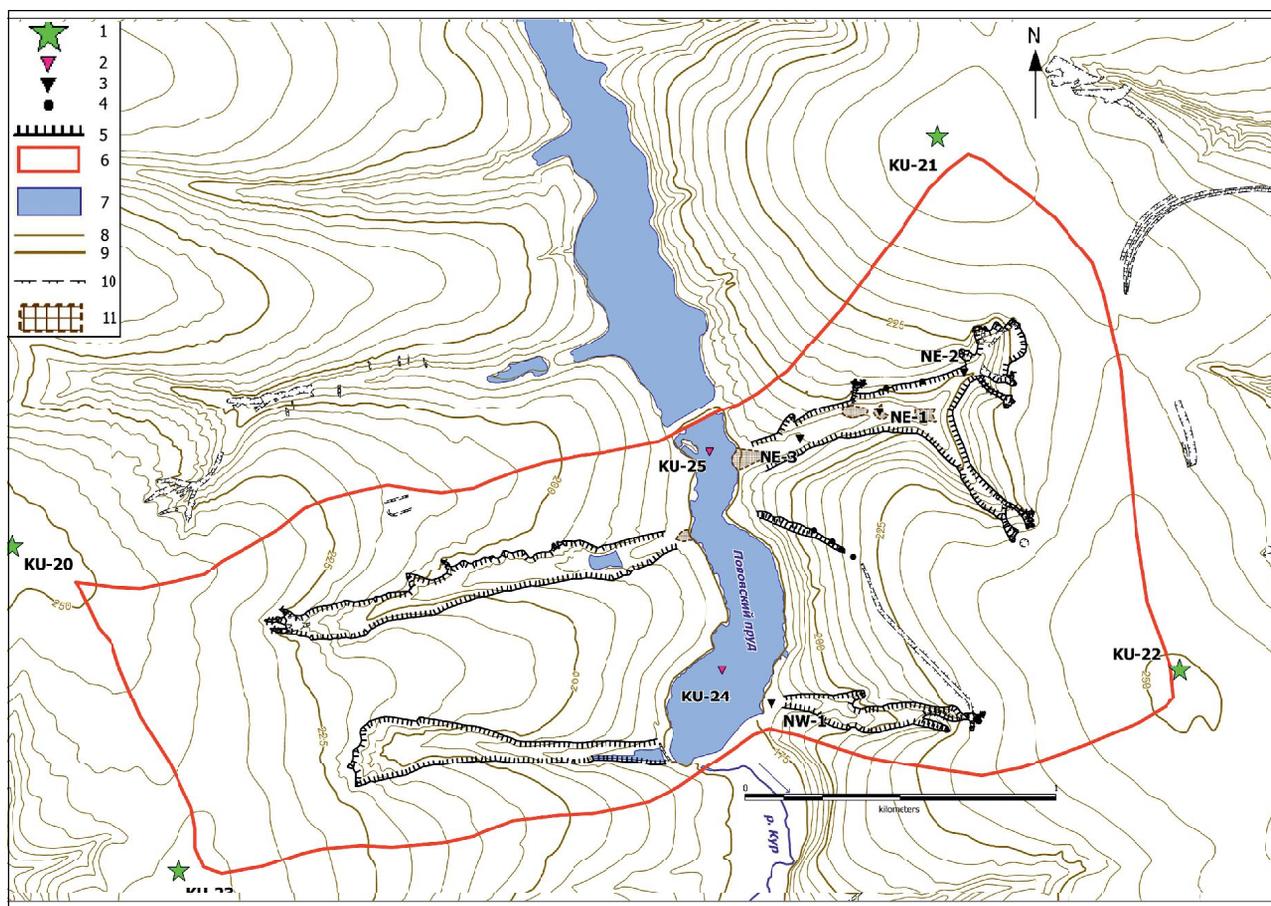


Рис. 1. Схема водосбора пруда Поповского в долине р. Кур и расположение точек отбора образцов на содержание ^{137}Cs . Точки отбора проб: 1 – опорные (интегральные); 2 – аккумулятивные позиции в днище пруда (последовательные); 3 – эрозивно-аккумулятивные позиции в днищах балок (последовательные); 4 – преимущественно эрозионные позиции в днищах и на бортах оврагов и балок (поверхностные). Прочие обозначения: 5 – бровки балок и оврагов; 6 – граница локального водосбора; 7 – водоемы; 8 – горизонтали (через 5 м); 9 – горизонтали (через 25 м); 10 – антропогенный рельеф (бровки насыпей и канав); 11 – конусы выноса

Fig. 1. Scheme of the catchment basin of the Popovskiy pond in the Kur River valley with ^{137}Cs sampling points. Sampling points: 1 – reference (depth-integrated); 2 – pond bottom deposition (depth-incremental); 3 – alternated erosion and deposition in balka bottoms (depth-incremental); 4 – predominantly erosion of gullies and balkas banks and bottoms (surface). Other signs: 5 – balka and gully banks upper breaks; 6 – pond catchment boundary; 7 – water bodies; 8 – contour lines (5 m interval); 9 – contour lines (25 m interval); 10 – anthropogenic topography (edges of ditches and embankments); 11 – debris fans

двух балок. С более крутых левых склонов долины сток поступает в пруд по днищам двух балок, верхние части которых являются активными оврагами, а также по оврагу антропогенного происхождения, растущему наискосок падения левого склона долины, вдоль канавы, отделяющей здесь залесенную часть водосбора от освоенной.

Коренные породы – мергели мелового возраста – вскрываются оврагами левой части водосбора. В пределах междуречий они перекрываются лессовидными суглинками, а на бортах долины – делювиальными отложениями. Крупность наносов, сформированных за счет склонового смыва, соответствует механическому составу покровных отложений, в которых преобладают частицы пылевой фракции. В овражных выносах также присутствуют обломки мергелей разной крупности, от дресвы до глыб. Однако непосредственно в пруд обломочный материал не поступал.

На всем водосборе пруда и р. Кур преобладают серые лесные среднесуглинистые почвы, преимущественно слабо и средне (на склонах с уклонами более 5°) смытые.

Территория характеризуется умеренным климатом с холодной зимой и теплым летом. С начала 1980-х гг. происходит постоянное повышение среднегодовой температуры воздуха за счет более теплых зим. По данным метеостанции Курска, годовой слой осадков изменяется по десятилетиям в интервале 616–648 мм, с преобладанием в последние годы осадков, выпадающих в виде дождей разной интенсивности. Помимо выпадений ^{137}Cs глобального происхождения с максимумом в 1963 г. в районе исследований произошло загрязнение изотопом цезия после аварии на Чернобыльской АЭС в конце апреля 1986 г., по плотности существенно превышающее величины глобальных выпадений.

С конца 1950-х гг. до 2012 г. землепользование на водосборе пруда Поповский достаточно сильно изменилось (рис. 2). Наиболее существенная трансформация началась на рубеже середины 1990-х гг. В этот период яблоневые сады стали вырубаться, на их месте появились частные дома, постепенно застраивалась и часть земель, ранее использовавшихся в качестве пашни. К 2012 г. сохранился только один массив обрабатываемой пашни, в северной и восточной части водосбора появились участки многоэтажной капитальной застройки (см. рис. 2). Особенно сильное влияние на динамику эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборе оказало строительство многоэтажного микрорайона в верховьях северо-восточной балки вдоль проспекта Победы со сплошным асфальтированием внутридворовых проездов.

Методика исследований. Чтобы более четко представить пространственно-временную динамику процессов перемещения вещества на фоне климатических изменений и трансформации типов землепользования за все время существования пруда, в пределах его водосбора были отобраны образцы почв, грунтов и отложений на участках сноса и ак-

кумуляции. Отбор проводился для последующего определения содержания ^{137}Cs и жирных кислот в лабораторных условиях.

Радиоцезиевый метод использовался для определения темпов аккумуляции наносов собственно в пруду и в днищах балок (по их длине) до и после 1986 г. Для определения содержания ^{137}Cs было отобрано и проанализировано 180 образцов (см. рис. 1). В их числе 12 образцов с четырех опорных участков (по три с каждого) для определения вариативности начального выпадения изотопа ^{137}Cs Чернобыльского происхождения; 67 образцов из двух разрезов в днище пруда (образцы отобраны послойно, через каждые 5 см с площади 10×10 см и до глубин 180 и 155 см в южной и северной частях пруда Поповского, соответственно); 90 образцов из днищ балок на левом борту долины (образцы отбирались послойно, каждые 5 см с площади 10×10 см до глубин 90–130 см); 11 образцов с поверхности (0–3 см) эрозионных форм с целью оценки современной концентрации изотопа ^{137}Cs .

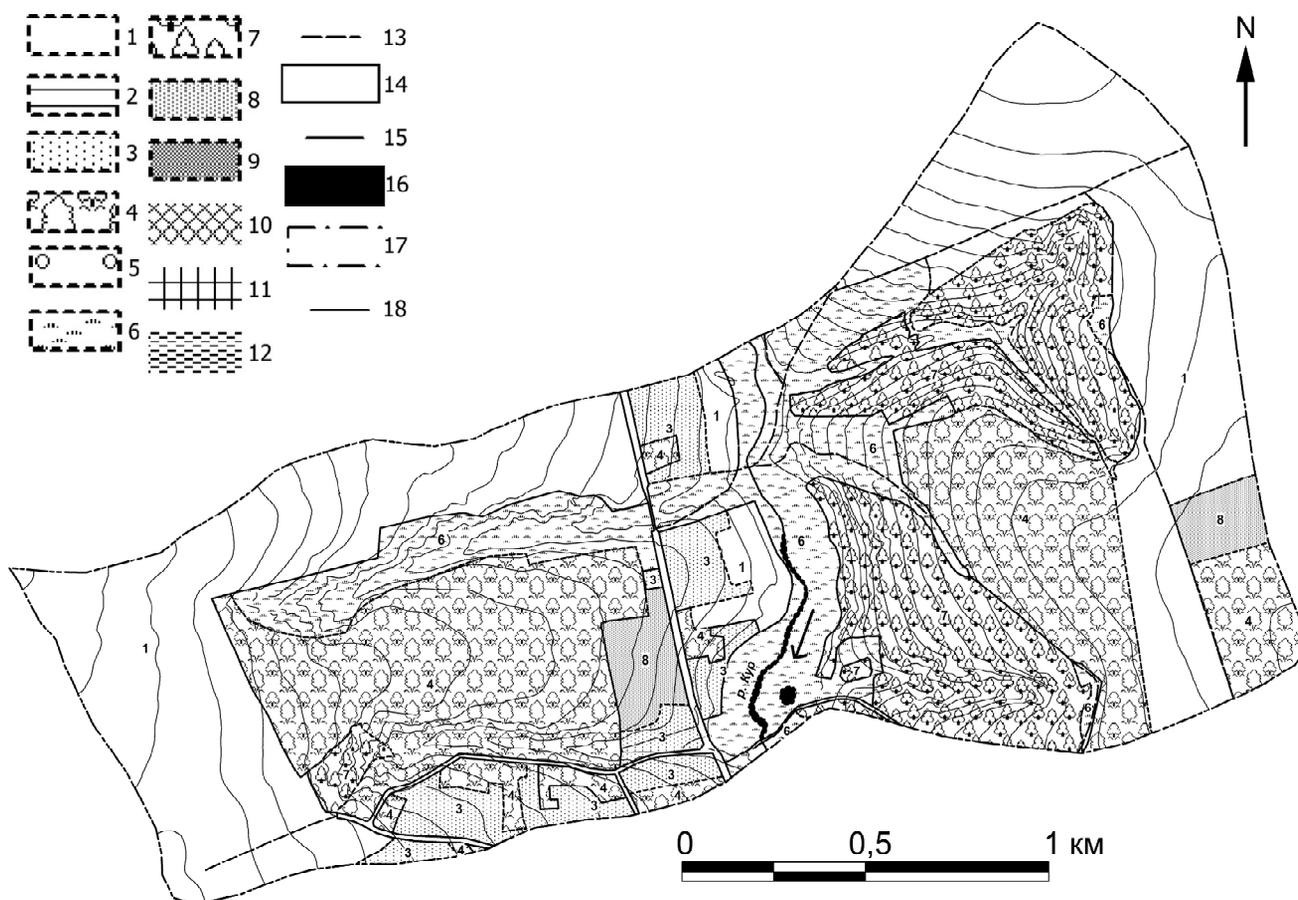
Образцы из днищ правобережных балок не отбирались, поскольку анализ их современной морфологии и особенностей землепользования на водосборах, в частности, наличие дамб и прудов в их низовьях, позволяет предположить отсутствие активного выноса материала после 1986 г. (т. е. после выпадения ^{137}Cs Чернобыльского происхождения).

На опорных участках (см. рис. 1) образцы отбирались для установления пространственной структуры выпадения ^{137}Cs Чернобыльского происхождения в первой половине мая 1986 г., так как «глобальный» ^{137}Cs поступал из атмосферы более равномерно по площади [Golosov, 2002]. Образцы были отобраны на междуречных пространствах, которые являются относительно геоморфологически стабильными, то есть в течение послечернобыльского периода на них не происходили вынос или поступление материала.

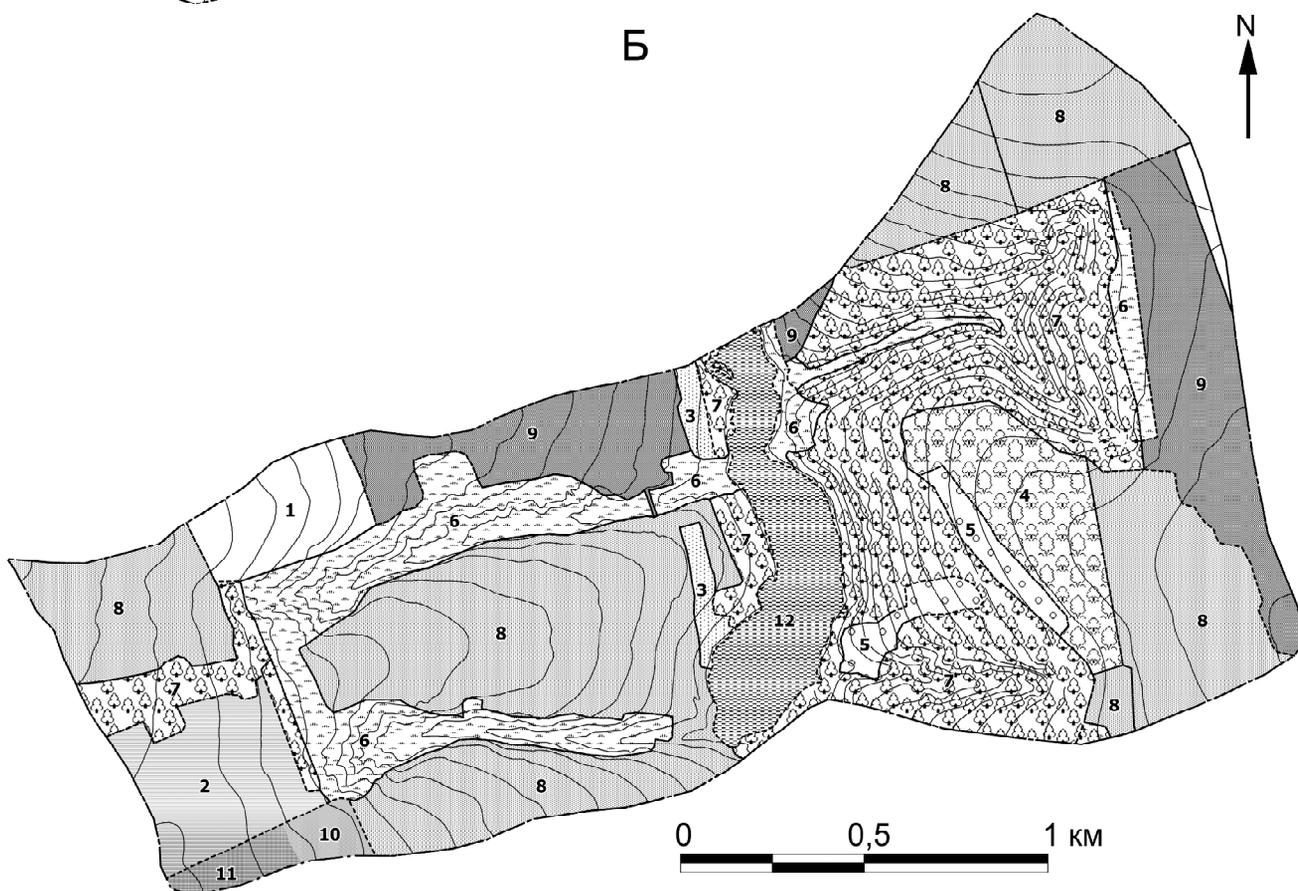
Отобранные образцы отложений доставлялись в лабораторию, высушивались до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C и взвешивались. Высушенные пробы размалывали и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм для гомогенизации образца. Гамма-спектрометрический анализ проб почвы проводили на гамма-спектрометре фирмы ООО НИИП «Грин Стар Инструментс»: СКС-07(09) П-Г-Р, Россия.

В результате анализа особенностей землепользования на водосборе в качестве источников наносов были выбраны следующие виды угодий: пашня, включая заброшенные участки, яблоневые сады, природный вторичный лес и лесопосадки. Отдельно были выделены активные овраги. Для определения содержания жирных кислот в пределах каждого источника наносов по меньшей мере в трехкратной повторности отбирались образцы верхнего слоя почвы (0–2 см) с фиксированной площади на участках потенциального выноса материала. Непосредственно после отбора образцов их высушивали при 50°C, просеивали через сито с диаметром отверстий

А



Б



2 мм и до проведения анализа выдерживали в сухих условиях без доступа света. Образцы, отобранные на каждом виде угодий и на бортах активных оврагов, были объединены в единый интегральный образец, характеризующий данный источник наносов. Отдельно из разрезов, вскрывающих аккумулятивную толщу в днище бывшего пруда, из разных слоев по глубине была отобрана интегральная проба, характеризующая содержание жирных кислот в зоне аккумуляции.

Аналитические исследования проводились в изотопной лаборатории Университета г. Гент (Бельгия). Общая процедура экстракции липидов основывалась на использовании смеси дихлорметан/метанол (DCM/MeOH) в качестве растворителя. Для разделения всех липидов на кислотную и нейтральную фракции использовали твердофазную экстракцию (SPE), заключающуюся в вакуумном элюировании в аминопропиловой колонне (картриджи с силикагелем, Agilent Technologies, Санта-Клара, США). Затем метилированную фракцию жирных кислот повторно растворяли и подвергали газовой хроматографической капиллярной изотопно-долевой масс-спектрометрии (GC-C-IRMS). Жирные кислоты (FAMES) были идентифицированы по времени их хранения с использованием смеси стандартизированных эталонов (FAMES). Для оценки достоверности различий значений $\delta^{13}C$ одинаковых жирных кислот для разных источников наносов был применен критерий Тьюки (Tukey's HSD test). Он показал, что выделенные источники наносов статистически значимо отличаются друг от друга. Пропорциональный вклад каждого источника наносов в донные отложения пруда оценивался с использованием пакета для анализа стабильных изотопов MixSIAR в среде R [Stock, Semmer, 2013]. Увеличение корреляции между источниками способствует росту уровня неопределенности в выходных данных модели. При этом для анализа используются только те биомаркеры, которые присутствуют как в материале источника сноса, так и в отложениях зоны осадконакопления.

Результаты. Для использования ^{137}Cs в качестве трассера было необходимо установить особенности его начального выпадения после аварии на Чернобыльской АЭС. Полученные данные позволяют выявить незначительный тренд, который прослеживается с ССВ на ЮЮЗ (табл. 1, см. рис. 1). Точка KU-23 немного выпадает из общего тренда, что

Таблица 1
Удельная активность и запас ^{137}Cs
в слое 0–25 см на опорных площадках
(положение площадок показано на рис. 1)

Опорная площадка	Средняя удельная активность, Бк/кг	Средний запас, кБк/м ²
KU-20	54,7	24,4
KU-21	60,5	26,3
KU-22	49,2	21,1
KU-23	37,7	16,1

связано, скорее всего, с механическим воздействием на почву, поскольку образец был отобран в заброшенном саду в пределах городской черты. В целом, можно говорить, что вариабельность начального выпадения по площади есть, но она незначительна и не влияет на проведенные оценки темпов аккумуляции, так как мощность отложений, накопившихся за периоды до и после 1986 г., определялась по положению чернобыльского пика концентраций изотопа цезия, который четко идентифицируется во всех разрезах.

Распределение ^{137}Cs по глубине в отложениях днищ балок левого борта долины р. Кур на участке пруда Поповского свидетельствует о том, что основная масса наносов аккумуляровалась в период до 1986 г., поскольку слои с максимальной концентрацией ^{137}Cs располагаются либо в приповерхностных 5 см (рис. 3Б, Г), либо в горизонте 5–10 см (рис. 3А, В). Слой с максимальной концентрацией ^{137}Cs соответствует поверхности днища в момент его выпадения из атмосферы в начале мая 1986 г. В то же время значимые концентрации ^{137}Cs зафиксированы во всей толще балочных отложений, залегающих на коренных породах, представленных мергелями. Из этого можно сделать вывод, что все наносы отложились в период не ранее 1954 г., когда начались выпадения из атмосферы ^{137}Cs глобального происхождения [Golosov, 2002].

С 1986 по 2012 гг. на конусе выноса и поверхности днища центральной части северо-восточной (верхней по течению) балки накопилось порядка 5 см наносов (см. рис. 3А, В), что соответствует темпам аккумуляции 1,8 мм/год. За предшествующий период 1954–1986 гг. среднегодовые темпы аккумуляции были почти на порядок выше, от 1,1 см/год у

Рис. 2. Структура землепользования исследуемого водосбора на основе топографической карты масштаба 1:10 000 1957 г. (А) и на основе космического снимка спутниковой системы GeoEye 25.09.2012 г. и данных кадастровой карты (Б). 1 – пашня; 2 – залежь; 3 – огороды; 4 – сады; 5 – заброшенные и вырубленные сады; 6 – луга и неудобья; 7 – леса и лесопосадки; 8 – малозэтажная застройка и дачные участки; 9 – капитальная застройка; 10 – промплощадка; 11 – карьер; 12 – территория спущенного пруда; 13 – грунтовые дороги; 14 – асфальтовые дороги и площади; 15 – водотоки; 16 – водоемы; 17 – граница локального водосбора; 18 – горизонталы (интервал – 5 м)

Fig. 2. Land use structure of the catchment under study according to 1:10 000 topographic map of 1957 (A) and from the GeoEye™ satellite image acquired 25.09.2012 and the cadaster map (B). 1 – arable lands; 2 – abandoned fields; 3 – allotment gardens; 4 – apple orchards; 5 – abandoned and cut orchards; 6 – meadows and rugged terrain; 7 – natural forests and forest plantations; 8 – low-storey residential houses and dachas; 9 – permanent residential houses; 10 – industrial sites; 11 – quarry; 12 – dried pond area; 13 – unpaved roads; 14 – paved roads and squares; 15 – streams; 16 – water bodies; 17 – pond catchment boundary; 18 – contour lines (5 m interval)

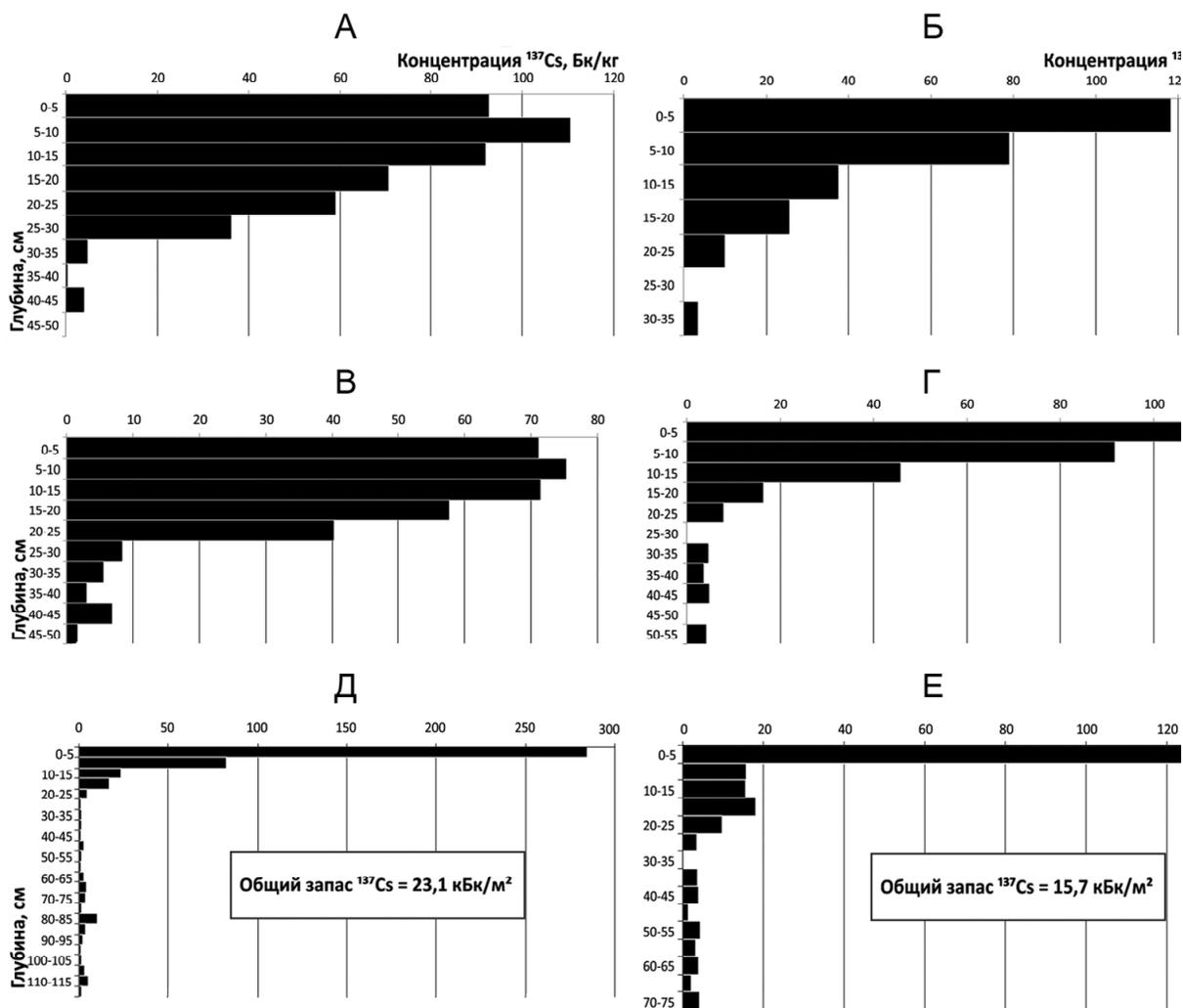


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs по глубине отложений на различных участках днищ балок, расположенных на левом борту долины (А – разрез NE-1, Б – разрез NE-2, В – разрез NE-3, Г – разрез NW-1) и в днище пруда Поповского (Д – разрез KU-24, Е – разрез KU-25). Положение разрезов см. на рис. 1

Fig. 3. Depth distribution of ^{137}Cs within different parts of balca bottoms on the left slope of the valley (A – section NE-1; Б – section NE-2; В – section NE-3; Г – section NW-1) and in the Popovsky pond bottom (Д – section KU-24; Е – section KU-25). Section locations – see Fig. 1

истоков балки до 1,6 см/год на конусе выноса. При этом фактически они могли быть еще больше, так как вполне возможно, что аккумуляция материала, особенно в верхней части днища балки, началась только после создания пруда в 1964 г. Кроме того, совершенно очевидно, что в период с момента создания пруда и до 1986 г. определенная часть наносов транзитом доставлялась в водоем. После 1986 г. поступление наносов с водосбора обеих левобережных балок практически прекратилось.

Дополнительным подтверждением резкого сокращения поступления наносов с водосбора в пруд является низкая (в интервале 4–42 Бк/кг) концентрация ^{137}Cs в верхних горизонтах отложений незакрепленных растительностью бортов и правых отвершков северо-восточной балки, а также верховьев и отвершков юго-восточной балки (см. рис. 1). Это существенно ниже, чем концентрация ^{137}Cs в приповерхностном горизонте отложений в днищах балок (см. рис. 3А–Г). Из этого следует, что осыпавшийся

с бортов материал переотложился в основаниях бортов оврагов, и только незначительная его часть была транспортирована ниже по течению, вероятнее всего в первые годы после Чернобыльской аварии.

Эпюры вертикального распределения ^{137}Cs в отложениях пруда также свидетельствуют о том, что после 1986 г. аккумуляция наносов здесь была ничтожно малой (см. рис. 3Д, Е). Максимумы содержания ^{137}Cs находятся в поверхностном пятисантиметровом слое отложений. В нижележащей толще ^{137}Cs прослеживается до глубин 120 и 75 см в разрезах KU-24 и KU-25 соответственно (см. рис. 3Д, Е). Причем в разрезе KU-24 на глубине 80–85 см выделяется второй пик содержания ^{137}Cs , который, вероятно, связан с максимумом выпадения ^{137}Cs глобального происхождения в 1963 г. Аналогичного пика в разрезе KU-25 нет. Нельзя исключать, что при строительстве в 1964 г. земляной плотины пруда, расположенного выше по течению от пруда Поповского (см. рис. 1) использовался грунт с днища

долины р. Кур, что могло привести к срезанию части пойменных отложений, накопившихся до 1964 г. Таким образом, за весь период существования пруда в нем отложилось не менее 75–80 см наносов, причем практически все они, за исключением верхних одно–двух сантиметров, поступили в водоем между 1964 и 1986 гг., то есть темпы аккумуляции достигали 3,2–3,4 см/год. Принимая, что аккумуляция наносов по всей акватории пруда (площадь 0,206 км²) была относительно равномерной, суммарный объем отложений за период 1964–2010 гг. можно оценить в 158–159 тыс. м³, из которых не менее 154 тыс. м³ или 185 тыс. т отложилось в период 1964–1986 гг. Наносы за все время существования пруда (до 2010 г. включительно) поступали только с площади водосбора. Средние темпы эрозии на водосборе за этот период не превышали 1,7 мм/год или 21 т/га в год. После 1986 г. вынос материала с водосбора в пруд резко сократился и соответствовал в период до 2010 г. слою сноса не более 0,03 мм/год.

Было проведено сопоставление набора жирных кислот, характерных для каждого источника наносов, который определяется составом биоценозов рассматриваемых угодий. Соответственно, для растительных сообществ яблоневого сада, естественного леса и лесопосадок эти показатели существенно отличаются, что подтверждается низкой корреляцией между ними или ее отсутствием (табл. 2). Практически нет связи между составом жирных кислот в наносах с перечисленных угодий и в овражных отложениях, так как, независимо от того, где располагается овраг, в его выносах преобладают продукты размыва покровных отложений и коренных пород, а не приповерхностных горизонтов почвы, содержащих жирные кислоты. Относительно высокая степень корреляции между лесопосадками и пашней, а также яблоневым садом и пашней может объясняться тем, что почвы под этими угодьями старопахотные, так как сигнал жирных кислот в верхних горизонтах сохраняется в течение десятилетий и даже столетий. Достаточно хорошая корреляция выявлена между отложениями активных оврагов и наносами с пашни. Концентрация жирных кислот, поступающих из посевных культур, на пахотных угодьях постоянно снижается из-за многократного перемешивания материала верхних 20–25 см. Кроме того, анализ топографических карт 1957 г. показывает наличие большого количества линейных размывов на распахиваемых склонах. Вероятно, активное развитие промоин продолжалось до начала 1980-х гг.

Оценки долевого вклада различных источников наносов в заиление пруда, полученные на основе использования жирных кислот в качестве трассиров, приведены на рис. 4. Согласно результатам этого метода, примерно половина наносов поступила за счет развития эрозионных процессов на пашне, на долю овражных наносов приходится порядка 18%, а вынос с остальных угодий еще меньше.

Обсуждение. Из основных особенностей водосбора пруда Поповского, определяющих механизм доставки наносов со склонов в днище долины, следует отметить наличие нескольких, ныне разрушенных, земляных плотин в днище одной из правобережных балок, расположенной в юго-западной части водосбора (см. рис. 1). В ее нижней части имеется небольшой водоем, плотиной которого служит насыпь асфальтированной дороги. Можно предположить, что определенная часть наносов, сформировавшихся на водосборе балки, переоткладывалась в ее днище, в том числе в многочисленных прудах. В следующей балке, впадающей в пруд в его верхней части, разрушенных земляных плотин нет, но есть небольшой водоем недалеко от устья, плотиной которого также служит автодорога. Однако наличие хорошо выраженного в рельефе конуса выноса на устьевом участке балки указывает на то, что данный водоем сооружен сравнительно недавно, и в нем не могло накопиться значительного количества наносов, транспортируемых по днищу балки при формировании поверхностного стока. Тем не менее, не подлежит сомнению, что часть наносов, смываемых с пашни на водосборе данной балки, переоткладывается в ее днище. Следует отметить, что на карте 1957 г. на левом борту балки вдоль границы пашни показаны многочисленные овражные врезы, что указывает на высокую активность эрозионных процессов в этот период.

Эрозионные формы, расположенные в пределах частично залесенной левобережной части водосбора Поповского пруда, существенно отличаются от балок его правобережной части. Их истоки и верхние участки являются действующими оврагами с незадернованными крутыми склонами и активными вершинами. В среднем течении борта балок на большом протяжении задернованы, но на них местами формируются оползни-сплывы. Северо-восточная балка также имеет несколько растущих правых отвешков, активность которых поддерживается поверхностным стоком вдоль асфальтовой дороги, ограничивающей водосбор пруда с севера. Днища этих эро-

Таблица 2

Корреляционная матрица соотношений набора жирных кислот источников наносов, поступавших в пруд Поповский, рассчитанная в моделях микширования из выходных данных пакета SIAR (значения корреляции между источниками находятся внутри полей)

		Лесопосадки (ЛП)	Овраги (ОВ)	Пашня (ПА)
Яблоневый сад (ЯС)	Естественный лес (ЕЛ) 0,1	0,2	0	0,5
		0,1	0,1	0,4
			0	0,2
			0	0,5

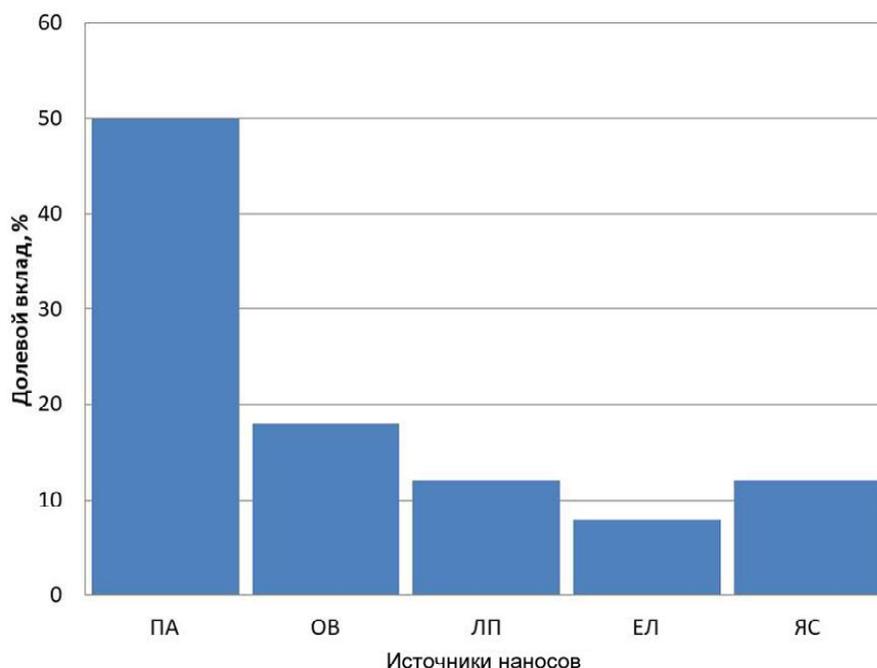


Рис. 4. Долевой вклад различных источников наносов в заиление пруда Поповского, определенный на основе использования жирных кислот в качестве трассера. ПА – пашня, ОВ – активные овраги, ЛП – лесопосадки, ЕЛ – природный вторичный лес, ЯС – яблоневые сады

Fig. 4. Contribution of different sediment sources to the Popovskiy pond siltation, determined with fatty acids as a tracer. ПА – arable lands; ОВ – active gullies; ЛП – forest plantations; ЕЛ – secondary forests; ЯС – apple orchards

зионных форм в настоящее время, в основном, задернованы, но по-прежнему довольно узкие и имеют значительный уклон. В нижнем течении они расширяются и выполаживаются, что способствует аккумуляции наносов. Конус выноса эрозионной формы, расположенной в юго-восточной части бассейна, перекрывает подножие борта долины и гипсометрически выше бывшей акватории пруда. Следовательно, можно предположить, что значительная часть наносов, формирующихся на водосборе, переотлагалась в днище эрозионной формы и на конусе выноса, не достигая пруда. Совершенно другая ситуация доставки наносов характерна для балки, расположенной в северо-восточной части водосбора: ее конус выноса выходит непосредственно в бывшую акваторию пруда. Здесь также отмечена наибольшая современная активность роста правых и верхних отвершков. Однако и в этом случае большая часть поступающего из них материала остается в пределах довольно крупного и морфологически четко выраженного внутреннего конуса в расширении нижней части днища балки, в районе разреза NE-3 (см. рис. 1, рис. 3В).

Таким образом, анализ характера землепользования и путей транспорта наносов внутри водосбора позволяет утверждать, что в заилении Поповского пруда участвовали наносы, поступавшие с обоих его бортов, при этом в основном в верхнюю часть водоема. Полученные результаты ставят два ключевых вопроса, нуждающихся в обсуждении:

1) Почему поступление наносов с водосбора в пруд практически прекратилось после 1986 г.?

2) Насколько точна оценка долевого вклада различных источников наносов при использовании в качестве трассера жирных кислот?

Основной причиной резкого сокращения поступления наносов с водосбора в пруд Поповский после 1986 г. следует признать практически полное прекращение поверхностного талого стока с сельскохозяйственных угодий в связи с потеплением климата. Это подтверждают изменения объемов стока весеннего половодья на реках Центрально-Черноземного региона, особенно значимые на рубеже 1980–1990 гг., когда существенно сократились максимальные расходы воды [Апухтин, Кумани, 2015]. С конца 1970-х гг. прослеживается ярко выраженный тренд уменьшения расходов воды весеннего половодья в целом в южной половине Восточно-Европейской равнины [Сафина, Голосов, 2018]. Причиной этого стало снижение глубины промерзания почвы в связи с повышением температуры воздуха в зимнее время, что привело к росту стока в зимнюю и летнюю межень за счет увеличения доли подземного стока. В качестве примера приводятся разностно-интегральные кривые максимальных расходов воды в период весеннего половодья на р. Тускарь, которая впадает в р. Сейм в Курске, и глубины промерзания почвы по метеостанции Курск, расположенной в непосредственной близости от восточной границы водосбора пруда Поповский (рис. 5). Уменьшение площади пашни со 134 до 50 га после 2003 г. стало дополнительным фактором, повлиявшим на сокращение эрозии на водосборе. Ведущая роль клима-

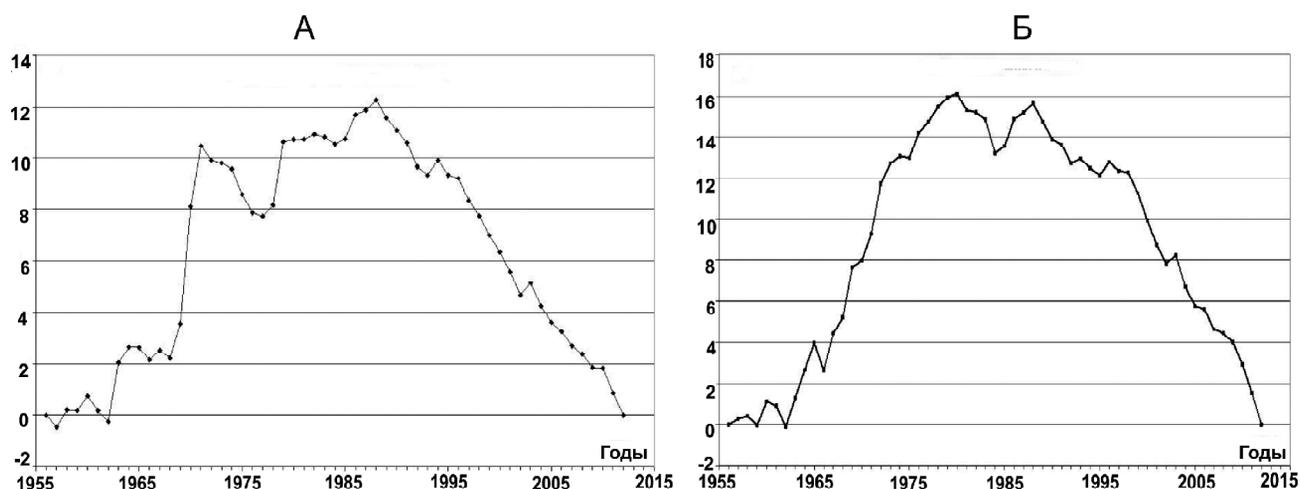


Рис. 5. Разностно-интегральные кривые: А – максимальных расходов весеннего половодья р. Тускарь, г/п Курск; Б – максимальных глубин промерзания почвы (по данным метеостанции г. Курска)

Fig. 5. Cumulative difference curves for: А – peak spring snowmelt flow discharge (the Tuskar River, Kursk gauging station); Б – maximum depth of winter frozen topsoil (Kursk meteorological station)

тических изменений подтверждается отсутствием после 1986 г. аккумуляции в днищах залесенных овражных форм левого борта долины, в верховьях которых на месте пашни возникла капитальная городская застройка с асфальтированием междомовых поверхностей.

Количественная оценка доли наносов, поступающих с различных угодий, проведена на основе сопоставления содержания жирных кислот в почве, которое самым тесным образом связано с характером растительности на разных типах землепользования и в донных отложениях пруда (см. рис. 4). Доминирующая роль продуктов смыва с пашни в заилении водоема не вызывает сомнений. Ситуация с овражными выносами более сложная. Овражные формы могут развиваться в пределах различных угодий. Так, на топографической карте 1957 г. показано большое число небольших овражных врезов на левом борту северо-западной балки, вершины которых выходят к краю пашни. Это указывает на значительный сток и смыв в этот период с пашни, который происходил за счет линейных размывов склоновых ложбин, т. е. по сути в результате оврагообразования. Еще одним подтверждением более существенного вклада овражных выносов в заиление пруда является низкое содержание ^{137}Cs в прудовых отложениях, не затронутых вертикальной миграцией ^{137}Cs Чернобыльского происхождения, а именно с глубины свыше 25 см (см. рис. 3Д, Е). Прослой с полным отсутствием ^{137}Cs , которые прослеживаются в разрезах донных отложений на одних и тех же глубинах (30–35 и 40–45 см), вероятно, связаны с единовременным поступлением значительного объема не содержащих изотопа Cs^{137} продуктов размыва бортов и днищ оврагов в результате мощного эрозионного события. В такой ситуации по данным радиоизотопного метода вынос матери-

ала из оврагов абсолютно доминировал над поступлением наносов из других источников.

Можно предположить, что доля наносов, поступивших с участков водосбора, которые находятся под вторичным березовым лесом, несколько завышена, так как почва в достаточно разреженном лесу хорошо защищена от смыва и размыва травянистой растительностью, в отличие от лесопосадок, где проективное покрытие поверхности почвы травянистой растительностью очень низкое. Поскольку действующие овраги расположены и в лесу, и в лесопосадках, то вполне возможно, что отложения на их бортах, которые при осypании вовлекались в сток наносов, также частично получали набор жирных кислот, характерный для леса, что привело к завышению доли материала, поступающего с залесенных участков, и, соответственно, к занижению вклада овражных выносов. Фактическая доля наносов, сформированных за счет размыва оврагов, вероятно, лишь немногим меньше объема продуктов эрозии, поступивших с пашни. Таким образом, использование жирных кислот в качестве трассеров для идентификации долевого вклада наносов, поступивших за счет эрозии почв и грунтов с различных типов землепользования, в случае малых водосборов с активным развитием овражной эрозии имеет некоторые ограничения. Метод хорошо оценивает вынос с площадей, занятых разной по составу растительностью (пашня, лес, лесополосы, сады). Но одна овражная система может пересекать различные угодья, а единичные линейные размывы в пределах пашни также встречаются достаточно часто. Все это вносит некоторую неопределенность в достоверность количественной оценки вклада различных видов землепользования, включая пашню (см. табл. 2). Корректировать эту неопределенность помогает использование других методов фингерпринтинга, в частности, радиоизотопного.

Выводы:

– применение независимых методов позволило исследовать динамику заиления и количественно оценить долевой вклад различных источников наносов ныне осушенного пруда Поповского, расположенного на окраине г. Курска. Установлено, что основной объем наносов, поступивших в водоем с его водосбора, сформировался за счет смыва и размыва участков пашни и роста оврагов в период с 1964 по 1986 гг;

– суммарный объем наносов, накопившихся в пруду за этот период, составил не менее 154 тыс. м³. Это соответствует среднегодовому слою сноса материала с площади водосбора в 1,7 мм. После 1986 г. и до момента осушения пруда в 2010 г. поступление наносов в пруд было минимальным. Это связано как с резким сокращением талого стока на склонах водосбора, которое произошло в связи со снижением глубины промерзания почв при повышении зимних температур воздуха начиная с 1980-х гг., так и с уменьшением площади пашни;

– для количественной оценки доли наносов, поступивших в пруд из разных источников, в качестве

трассеров использовались жирные кислоты как один из вариантов метода фингерпринтинга. По данным метода жирных кислот, основной объем наносов, накопившихся в пруду, сформировался за счет продуктов смыва с пашни (50% от общего объема наносов), линейного и площадного прироста оврагов (не менее 18%). Достоверно определить долю наносов, сформировавшихся за счет смыва под вторичным лесом, лесопосадками и в яблоневых садах по набору жирных кислот не представляется возможным, так как действующие овраги расположены внутри этих угодий или граничат с ними. Поэтому при использовании содержания жирных кислот для разделения долевого вклада различных источников наносов на малых водосборах с активным оврагообразованием необходимо привлекать дополнительные методы. Использование нами изотопа Cs¹³⁷ в качестве независимого трассера позволило скорректировать оценки доли каждого из источников наносов, полученные методом жирных кислот, в пользу увеличения вклада овражной эрозии.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д. Гюйгенсу (Университет г. Гент, Бельгия) за проведение аналитических исследований содержания жирных кислот в образцах почвы и наносов, сотрудникам географического факультета Ю.С. Кузнецовой и Т.С. Кошовскому за участие в полевых работах. Работа подготовлена по госзаданию НИЛ эрозии почв и русловых процессов географического ф-та МГУ, № АААА-А16-116032810084-0» (определение содержания ¹³⁷Cs в образцах, методика) и при финансовой поддержке РФФИ №19-29-05025мк (расчеты и подготовка текста статьи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анухтин А.В., Кумани М.В.* Многолетняя динамика основных элементов весеннего стока малых и средних рек Центрального Черноземья // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 33. № 21(218). С. 114–120.
- Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы и баланс наносов в бассейне р. Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1988. № 6. С. 15–24.
- Розенцвет О.А., Федосеева Е.В., Терехова В.А.* Липидные биомаркеры в экологической оценке почвенной биоты: анализ жирных кислот // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. № 2. С. 1–17.
- Сафина Г.Р., Голосов В.Н.* Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины Европейской территории России // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2018. Т. 160. Кн. 1. С. 111–125.
- Фарходов Ю.Р., Иванов В.А., Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Куликова Н.А.* Жирные кислоты как биомаркеры типичных черноземов разного вида использования // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2019. № 1. С. 17–22.
- Badri D.V., Vivanco J.M.* Regulation and function of root exudates. *Plant Cell Environ.*, 2009, no. 32, p. 666–681.
- Banowetz G.M., Whittaker G.W., Dierksen K.P., Azevedo M.D., Kennedy A.C., Griffith S.M., Steiner J.J.* Fatty acid methyl ester analysis to identify sources of soil in surface water. *J. Environ. Qual.*, 2006, no. 35, p. 133–140.
- Belyaev V., Golosov V., Markelov M., Ivanova N., Shamshurina E., Evrard O.* Effects of Land Use and Climate Changes on Small Reservoir Siltation in the Agricultural Belt of European Russia. Proc. Symp. H09 «Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management» (July 22–26, 2013, Gothenburg), IAHS Proceedings and Reports, 2013, vol. 362, p. 134–145.
- Blessing M., Jochmann M., Schmidt T.* Pitfalls in compound-specific isotope analysis of environmental samples. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2008, vol. 390, p. 591–603.
- Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M.A.* Toolbox for sediment budget research in small catchments. *Geography, Environment, Sustainability*, 2017, no. 10, p. 43–68. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68.
- Golosov V.N.* Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002, p. 165–183.
- Loska K., Wiechuia D.* Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 2003, vol. 51, p. 723–733.
- Mead R., Xu Y., Chong J., Jaffé R.* Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of n-alkanes. *Org. Geochem.*, 2005, vol. 36, p. 363–370.
- Minella J.P.G., Walling D.E., Merten G.H.* Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the

impact of improved land management on catchment sediment yields. *J. Hydrol.*, 2008, vol. 348, p. 546–563.

Poulenard J., Legout C., Némery J., Bramorski J., Navratil O., Douchin A., Fanget B., Perrette Y., Evrard O., Esteves M. Tracing sediment sources during floods using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectrometry (DRIFTS): a case study in a highly erosive mountainous catchment (Southern French Alps). *J. Hydrol.*, 2012, vol. 414–415, p. 452–462.

Small I.F., Rowan J.S., Duck R.W. Long-term sediment yield in Crombie Reservoir catchment, Angus, and its regional significance within the Midland Valley of Scotland. *Hydrological Sciences*, 2003, no. 48, p. 619–635.

Walling D.E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, vol. 13, p. 1658–1675.

Williams M.A., Myrold D.D., Bottomley P.J. Carbon flow from ¹³C-labeled straw and root residues into the phospholipid fatty acids of a soil microbial community under field conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, no. 38, p. 759–768.

Электронный ресурс

Stock B.C., Semmer B.X. MixSIAR GUI User Manual version. 2013. URL: <http://conserver.iugo-cafe.org/user/brice.semmens/MixSIAR>. (дата обращения 04.09.2019)

Поступила в редакцию 06.04.2020

После доработки 14.07.2020

Принята к публикации 06.08.2020

V.N. Golosov^{1,2,3}, M.V. Kumani⁴, N.N. Ivanova⁵,
V.R. Belyaev⁶, E.N. Shamshurina⁷

SILTATION OF A SMALL RESERVOIR UNDER CLIMATIC CHANGES AND URBANIZATION OF ITS CATCHMENT BASIN (THE POPOVSKY POND, KURSK)

The rates of erosion-accumulation processes were estimated and the contribution of various sediment sources was identified for the catchment of the actually drained Popovsky Pond, located in the northern outskirts of Kursk. The rates of sediment accumulation in the pond and dry valley bottoms over two time intervals were determined using ¹³⁷Cs of Chernobyl and global origin as a tracer. Fatty acids were for the first time used in Russia as tracers to assess the contribution of various sediment sources. It was established that 97–98% of sediment accumulated in the bottom of the pond came from the catchment in the period of 1964–1986, and the denudation rate in the catchment area was 1,7 mm/year. Sediment yield from the pond catchment was minimal after 1986 until it was drained in 2010. A sharp decrease in sediment yield results from higher air temperatures in the winter months after 1986, which led to a decrease in the frozen soil depth and an almost complete cessation of surface water runoff and erosion during spring snowmelt. Land-use changes in the catchment area with a significant reduction of arable lands and an increase of urban areas, especially since the late 1990s, was an additional, but less significant factor. It has been established that the sediments eroded from the arable lands were the main source of pond siltation. They account for 50% of the total sediments accumulated in the pond. At least 18% of bottom sediments are produced by gully erosion. Moreover, the actual contribution of gully erosion may be even higher. This is due to the fact that the use of fatty acids as tracers makes it impossible to reliably separate sediments which were formed due the gully erosion under the forest and between the forest and the apple orchard from the sediments which were formed due to soil erosion in the garden and in the forest.

Key words: rates of erosion and accumulation, sediment sources, fingerprinting, ¹³⁷Cs, fatty acids

Acknowledgements. The authors are grateful to D. Huygens (University of Ghent, Belgium) for carrying out analytical studies of the content of fatty acids in soil and sediment samples, and to Yu.S. Kuznetsova and T.S. Koshovsky from the Faculty of Geography for participation in field work. The paper was prepared under the state assignment AAAA-A16-116032810084-0 of the Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, MSU Faculty of Geography, “(determination of ¹³⁷Cs content in samples, methodology); the work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-29-05025mk) (calculations and preparation of the text).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail:* golossov@gmail.com

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geomorphology, Chief Scientific Researcher

³ Kazan Federal University, Institute of Physics, Research Laboratory of Space Ecology, Chief Scientific Researcher

⁴ Kursk Federal University, Faculty of Natural and Geographical Sciences, Department of Geography, Professor, D.Sc. in Agriculture; *e-mail:* kumanim@yandex.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* nadine_iv@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* vladimir.r.belyaev@gmail.com

⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD in Biology; *e-mail:* shamshyr@mail.ru

REFERENCES

- Apukhtin A.V., Kumani M.V. Mnogoletnjaja dinamika osnovnyh elementov vesennego stoka malyh i srednih rek Central'nogo Chernozem'ja [Longstanding dynamics of basic elements of the spring drain of the small and middle rivers of the Central Chernozem region]. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*, 2015, vol. 33, no. 21(218), p. 114–120. (In Russian)
- Badri D.V., Vivanco J.M. Regulation and function of root exudates. *Plant Cell Environ.*, 2009, no. 32, p. 666–681.
- Banowetz G.M., Whittaker G.W., Dierksen K.P., Azevedo M.D., Kennedy A.C., Griffith S.M., Steiner J.J. Fatty acid methyl ester analysis to identify sources of soil in surface water. *J. Environ. Qual.*, 2006, no. 35, p. 133–140.
- Belyaev V., Golosov V., Markelov M., Ivanova N., Shamshurina E., Evrard O. Effects of Land Use and Climate Changes on Small Reservoir Siltation in the Agricultural Belt of European Russia. Proc. Symp. H09 «Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management» (July 22–26, 2013, Gothenburg), IAHS Proceedings and Reports, 2013, vol. 362, p. 134–145.
- Blessing M., Jochmann M., Schmidt T. Pitfalls in compound-specific isotope analysis of environmental samples. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2008, vol. 390, p. 591–603.
- Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M.A. Toolbox for sedimentbudget research in small catchments. *Geography, Environment, Sustainability*, 2017, no. 10, p. 43–68. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68.
- Farhodov Ju.R., Ivanov V.A., Holodov V.A., Jaroslavceva N.V., Jashin M.A., Kulikova N.A. Zhirnye kisloty kak biomarkery tipichnyh chernozemov raznogo vida ispol'zovanija [Fatty acids as biomarkers of typical chernozems under different management practices]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya Pochvovedenie*, 2019, no. 1, p. 17–22. (In Russian)
- Golosov V.N. Eroziionno-akkumuljativnye processy i balans nanosov v bassejne r. Protvy [Erosion-accumulative processes and sediment budget in the Protva River basin]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya geografiya*, 1988, no. 6, p. 15–24. (In Russian)
- Golosov V.N. Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides: Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002, p. 165–183.
- Loska K., Wiechula D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 2003, vol. 51, p. 723–733.
- Mead R., Xu Y., Chong J., Jaffé R. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of n-alkanes. *Org. Geochem.*, 2005, vol. 36, p. 363–370.
- Minella J.P.G., Walling D.E., Merten G.H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. *J. Hydrol.*, 2008, vol. 348, p. 546–563.
- Poulenard J., Legout C., Némery J., Bramorski J., Navratil O., Douchin A., Fanget B., Perrette Y., Evrard O., Esteves M. Tracing sediment sources during floods using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectrometry (DRIFTS): a case study in a highly erosive mountainous catchment (Southern French Alps). *J. Hydrol.*, 2012, vol. 414–415, p. 452–462.
- Rozencvet O.A., Fedoseeva E.V., Terehova V.A. Lipidnye biomarkery v ekologicheskoj ocenke pochvennoj bioty: analiz zhirnyh kislot [Lipid biomarkers in the environmental assessment of soil biota: fatty acid analysis]. *Uspehi sovremennoj biologii*, 2019, vol. 139, no. 2, p. 1–17. (In Russian)
- Safina G.R., Golosov V.N. Vlijanie izmenenij klimata na vnutrigodovoe raspredelenie stoka malyh rek juzhnoj poloviny Evropejskoj territorii Rossii [The Effect of Climate Change on the Annual Flow Distribution of Small Rivers in the Southern Half of the European Territory of Russia]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, p. 111–125. (In Russian)
- Small I.F., Rowan J.S., Duck R.W. Long-term sediment yield in Crombie Reservoir catchment, Angus, and its regional significance within the Midland Valley of Scotland. *Hydrological Sciences*, 2003, no. 48, p. 619–635.
- Walling D.E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, vol. 13, p. 1658–1675.
- Williams M.A., Myrold D.D., Bottomley P.J. Carbon flow from ¹³C-labeled straw and root residues into the phospholipid fatty acids of a soil microbial community under field conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, no. 38, p. 759–768.
- Web source
Stock B.C., Semmer B.X. MixSIAR GUI User Manual version. 2013. URL: <http://conserver.iugo-cafe.org/user/brice.semmers/MixSIAR> (access date 04.09.2019).

Received 06.04.2020

Revised 14.07.2020

Accepted 06.08.2020