

Методика научных исследований

УДК 551.4.012:551.435.162

© 2005 г. **В.Р. БЕЛЯЕВ, В.Н. ГОЛОСОВ, А.Ю. СИДОРЧУК,
П.ДЖ. УОЛЛБРИНК, Э.С. МЮРРЕЙ****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОИЗОТОПОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ
СТАДИЙ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОВРАГОВ¹****Постановка проблемы**

Известные к настоящему времени методы исследования овражной эрозии можно подразделить на две группы. К первой относятся методы прямых стационарных или полустационарных наблюдений за динамикой развития оврага. Они достаточно трудоемки и требуют значительной продолжительности рядов наблюдений для выявления особенностей формирования оврага на различных стадиях его развития. В большинстве случаев проводятся регулярные измерения линейного прироста оврагов, реже – изменений их площадей и объемов [1–4]. Продолжительность имеющихся рядов не превышает 30 лет. Данные непосредственных наблюдений за ростом оврагов на первых, наиболее динамичных стадиях развития встречаются довольно редко. Это связано с объективными причинами, в первую очередь с большой ролью случайных факторов в формировании начального овражного вреза. Прямые наблюдения за стоком воды и наносов в овраге еще более трудоемки и поэтому еще более редки [5–9].

Другую группу составляют косвенные методы изучения развития овражных форм. Они подразделяются на методы сопоставления картографических изображений оврагов на топографических картах или планах, составленных за различные промежутки времени [3, 10], сравнения аэрофотоснимков [3], полученных при повторных залетах, и методы датирования овражных отложений, осуществляемых по находкам различных артефактов и дендрохронологическим методом [11, 12]. Перспективна методика определения возраста оврага по развитости почв на его склонах, предложенная Л.А. Моряковой [13]. Но она требует дальнейшего совершенствования, а также дает представление о времени стабилизации склонов, а не прекращения активного роста оврага.

Широко используемые методы анализа голоценовых отложений (радиоуглеродный, термолюминесцентный, спорово-пыльцевой и др.) не могут применяться для датирования при исследовании современных оврагов (возраст 200–300 лет и менее) поскольку их точность составляет как минимум первые сотни лет. В представленной статье на примере исследования оврага, расположенного на Ставропольской возвышенности в бассейне р. Калаус, демонстрируются возможности использования естественных (атмосферный свинец-210, литогенные радиоизотопы радий-226, торий-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке МАГАТЭ (проект № 11406/RO), РФФИ (проект № 01-05-64503) и в рамках программы поддержки ведущих научных школ России (проект № 00-15-98512).

232 и калий-40) и искусственных (изотоп цезия-137) радиоизотопов для реконструкции его этапов развития и выявления источников формирования наносов.

Искусственный изотоп цезий-137 (^{137}Cs), возникновение которого связано с атмосферными испытаниями ядерного оружия и авариями на объектах атомной индустрии, широко применяется для оценки темпов и пространственного положения зон эрозии и аккумуляции в пределах отдельных склонов или склоновых водосборов, определения баланса наносов в пределах малых водосборов, изучения тоннельной эрозии [14]. В зонах аккумуляции обычно наблюдаются две временных метки: начало выпадения изотопа ^{137}Cs (1954 г.) и пика его выпадения в период проведения взрывов в открытой атмосфере (1963 г.). В регионах с умеренным и слабым радиоактивным загрязнением в результате аварии на Чернобыльской АЭС наблюдается дополнительная третья метка, связанная с выпадением ^{137}Cs весной 1986 г. [15]. На территориях с сильным Чернобыльским загрязнением, как правило, легко фиксируется только пик 1986 г. [16]. Особенности применения ^{137}Cs в качестве трассера перемещения почвенных частиц в геоморфологических исследованиях в различных регионах мира подробно изложены в опубликованном МАГАТЭ руководстве [17] и многочисленных статьях [14–16, 18 и др.].

Атмосферный (или неравновесный) свинец-210 ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) – естественный радиоизотоп (одно из звеньев цепочки распада урана-238), поступающий на поверхность почвы с осадками и прочно сорбирующийся почвенными частицами преимущественно тонких фракций, аналогично ^{137}Cs . Он довольно широко используется в геоморфологических исследованиях для датирования молодых (в пределах 100–150 лет) донных отложений небольших стоячих водоемов и определения темпов осадконакопления в них [18, 19]. Поскольку перераспределение $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ в ландшафтах сходно с ^{137}Cs , очевидной является возможность его применения для почвенно-эрозионных исследований по аналогичной методике [20, 21 и др.].

Литогенные радиоизотопы радий-226, торий-232 и калий-40 успешно применялись для определения вклада различных процессов денудации в сток наносов [22, 23]. При этом оценивались закономерности изменения концентраций изотопов по профилю почвы и коры выветривания коренных пород. Было показано, что характерно закономерное изменение соотношения содержания данных радиоизотопов по глубине, что связано с разной химической активностью изотопов и скоростью их перехода в водные растворы. Таким образом, наносы, образующиеся, например, в результате поверхностной (плоскостной и бороздковой) эрозии, будут отличаться по соотношению концентраций литогенных радиоизотопов от формирующихся в глубоких (промоины, овраги) размывах.

Совместно все перечисленные радиоизотопы для реконструкции истории развития овражного вреза ранее не использовались.

Характеристики района и объекта исследований

Объект исследований расположен в верхней части бассейна р. Калаус, дренирующей северный мегасклон Ставропольской возвышенности. Территория характеризуется возвышенным рельефом с максимальными отметками более 600 м, высоты междуречий постепенно снижаются к северу. Глубина расчленения достигает 100–150 м. Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, но ежегодные отклонения от этой величины в ту или иную сторону могут быть весьма значительны [24]. Относительно теплые зимы со средними температурами около 0°С с ноября по февраль и небольшим количеством осадков в виде снега не способствуют формированию значительного талого стока. Проявления эрозии связаны преимущественно с осадками теплого периода [25], который характеризуется чередованием засушливых лет (до 8–10) и периодов с относительно частыми интенсивными ливнями (2–4 года) [24, 26]. Интенсивность ливней весенне-летнего периода может достигать 30–60 мм/ч.

Естественная растительность представлена дерновиннозлаковыми и, реже, разно-травно-дерновиннозлаковыми степными сообществами, но в настоящее время на большей части территории она либо полностью сведена, либо серьезно деградирована в результате хозяйственной деятельности человека. Пахотные угодья занимают около 45–50% земель, в основном на плоских водоразделах и относительно пологих склонах. Крутые склоны балок и речных долин используются в качестве пастбищ.

Активное освоение земель Ставропольской губернии началось в конце XIX в. [27]. В верхней части бассейна р. Калаус, из-за относительно большой средней крутизны склонов, широкомасштабная распашка стала возможной только с внедрением более мощной и совершенной сельскохозяйственной техники. Этот период (1925–1935 гг.) совпал по времени с коллективизацией сельского хозяйства в СССР и укрупнением полей [28]. Одновременно сокращались площади пастбищ, что резко увеличивало нагрузку на сохранившиеся выпасы.

Именно с этим периодом, вероятно, был связан начальный этап интенсивного роста антропогенной овражной сети Ставрополя. В пределах исследуемой части Ставропольской возвышенности наиболее широко распространены вторичные овраги, расчленяющие днища более древних отрицательных форм рельефа и наследующие их водосборы. В то же время, встречаются и первичные овраги, сформировавшиеся на ранее нерасчлененных склонах в результате образования искусственных водосборов и рубежьи стока (дороги, напашы, границы земельных угодий, разъемные борозды, участки сброса ирригационных вод и др.).

Овраг, выбранный в качестве объекта исследований, расположен на левом (восточной экспозиции) борту долины р. Калаус, в 1.5 км к югу от села Сергиевское (рис. 1 А). Этот вторичный овраг врезан в днище древней ложбины длиной ≈ 1300 м с мультимодальным поперечным профилем и довольно большим уклоном тальвега (в среднем 0.05). Расчленяемый ложбиной борт долины имеет сложный выпукловогнуто-выпуклый профиль: в верхней (коренной) части крутизна его $5\text{--}11^\circ$, в нижней (представляющей собой сочетание комплекса террас р. Калаус и наложенных на них склоновых шлейфов) – $0.5\text{--}3^\circ$. Общий перепад высот между водоразделом и урезом реки достигает 120 м. Длина водосбора ≈ 1.5 км, ширина от 250 до 700 м, общая площадь 0.65 км². Овраг занимает порядка 80% протяженности водосбора, освоив днище древней ложбины практически на всю длину. Глубина вреза оврага 3–5 м. На период полевых работ в 1993–94 гг. борта оврага были большей частью задернованы и стабильны. Вторичный врез глубиной и шириной до 1 м прорезает днище в среднем и нижнем течении оврага. Его общая длина составляет ≈ 400 м, из которых активное врезание происходит на верхних ≈ 260 м, ниже преобладает транзит и частичное переотложение наносов. Донный врез местами активизировал эрозионные и склоновые процессы на бортах и в отвершках основного оврага. Конус выноса оврага, опирающийся на поверхность высокой поймы Калауса, четко выражен в рельефе.

Водосбор полностью используется как постоянное пастбище, в результате чего зональная степная растительность сильно угнетена. По имеющимся данным, водосбор никогда не распахивался, что связано с большими уклонами и довольно сложной формой склонов. В устье оврага в 1986 г. была построена земляная плотина без водосброса с целью защиты от овражных выбросов насосной станции и дороги, расположенных в днище долины Калауса (рис. 1 А). Так как не был сооружен водосбор, дамба вскоре была прорвана. Образовавшийся прорыв на момент полевого обследования в 1994 г. представлял собой овраг длиной ≈ 50 м, шириной 1–3 м и глубиной до 3.5 м, продолжающий расти (линейный прирост вершины ≈ 1.5 м за 1993–1994 гг.). Ниже прорыва на поверхности основного конуса сформировался свежий конус выноса длиной ≈ 150 м, шириной 10–40 м и площадью ≈ 3000 м² (рис. 1 А, Б).

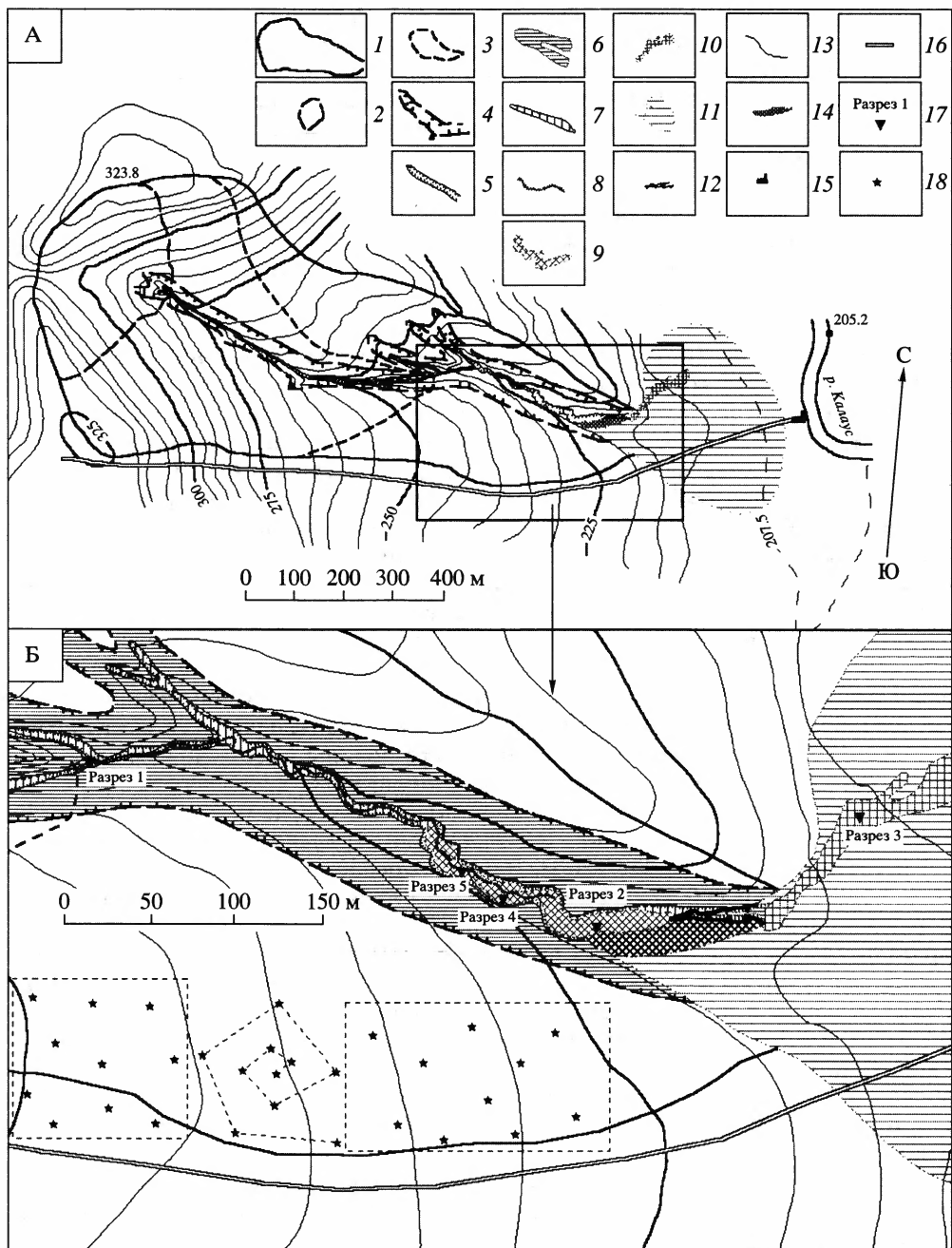


Рис. 1. Общая схема исследованного овражного водосбора (А) и геоморфологическая схема участка детального обследования (Б)

Границы водосбора: 1 – оврага, 2 – вершины оврага на момент стабилизации, 3 – вершины донного вреза на 1994 г.; **бровки склонов:** 4 – первичной ложбины, 5 – оврага; **склоны и днище:** 6 – первичной ложбины, 7 – оврага; 8 – вторичный донный врез; 9 – зона осадконакопления в нижней части оврага выше дамбы; 10 – аккумулятивный шлейф ниже прорыва дамбы; 11 – конус выноса; 12 – эрозионный врез в прорыве дамбы; 13 – изогипсы; 14 – дамба; 15 – насосная станция; 16 – трубопровод; 17 – геологические разрезы; 18 – точки отбора проб на эталонном участке

Для реконструкции истории развития оврага использовались различные подходы, включая: 1) изучение морфологии и морфометрии оврага и его водосбора с теодолитной съемкой участка детальных исследований; 2) подробное описание и анализ отложений в днище и конусе выноса оврага, денудационных процессов на его бортах; 3) крупномасштабное геоморфологическое картографирование водосбора оврага; 4) сбор и анализ информации об истории и особенностях землепользования и многолетних метеорологических данных; 5) отбор образцов для лабораторных анализов содержания в грунтах и отложениях на различных элементах рельефа радиоактивных изотопов цезия-137 (^{137}Cs), неравновесного (или атмосферного) свинца-210 ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) и литогенных (источниками которых являются коренные породы) радиоизотопов – радия-226 (^{226}Ra), тория-232 (^{232}Th) и калия-40 (^{40}K) для стратиграфического расчленения овражных наносов и определения основных источников сноса в пределах водосбора.

Отобранные в поле образцы почв и грунтов анализировались в радиоизотопной лаборатории CSIRO Land and Water Division (Канберра, Австралия), где вначале была проведена их подготовка: образцы были высушены, прокалены при температуре 400°C для удаления органики и определения ее весового содержания, измельчены и гомогенизированы при помощи механической кольцевой мельницы. Гамма-спектрометрический анализ активности радиоизотопов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{40}K и ^{210}Pb в подготовленных образцах проводился согласно методике, предложенной Э.С. Мюррэм с соавторами [29]. Активность ^{232}Th была рассчитана как среднее активностей двух его производных – ^{228}Ra и ^{228}Th , предполагая наличие установившегося длительного равновесия между ^{228}Ra и ^{232}Th . При анализах использовались три широкодиапазонных планарных детектора с кристаллами из сверхчистого германия (HPGe Closed Ended 'n' type Coaxials), производства фирм "Ortec" и "Canberra". Подсчет гамма-импульсов для каждого образца проводился в течение не менее 85 000 с.

Основные результаты

Определение величины атмосферного привноса ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Величины содержания изотопов ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ в почве на эталонном ненарушенном участке (рис. 1 Б) и характеристики их вариабельности приведены в табл. 1. Средний запас ^{137}Cs в почве – 4910 Бк/м^2 , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ – 3340 Бк/м^2 . Высокие коэффициенты вариации, характерные для обоих радиоизотопов (28% для цезия и 41% для неравновесного свинца), могут быть связаны с локальным переносом со стоком непосредственно после выпадения, но до момента их сорбирования почвенными частицами, а также перераспределением в результате вытаптывания поверхности почвы скотом. Учитывая значительную пространственную изменчивость запаса изотопов в почве эталонного участка, были рассчитаны доверительные интервалы полученных величин общего атмосферного привноса для допустимой ошибки $\pm 10\%$ (табл. 1).

Поскольку, в отличие от ^{137}Cs , среднегодовой привнос $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ из атмосферы на единицу площади поверхности постоянен во времени [18], запас изотопа в различных слоях отложений зон аккумуляции можно использовать для их датирования. Величина среднегодового привноса неравновесного свинца I_{Pb} может быть рассчитана из общего запаса изотопа исходя из длительного установившегося равновесия между выпадением из атмосферы и радиоактивным распадом:

$$I_{\text{Pb}} = A_{\text{refPb}} \times \lambda_{\text{Pb}}, \quad (1)$$

где A_{refPb} – средний запас $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ в почве на эталонном участке (Бк/м^2), λ_{Pb} – константа радиоактивного распада $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, равная 0.031 г^{-1} .

Полученное значение – 104 Бк/м^2 , доверительный интервал $\pm 13 \text{ Бк/м}^2$ для допустимой ошибки $\pm 10\%$.

Статистические характеристики содержания цезия-137 и атмосферного свинца-210 в почве на эталонном участке

Радиоизотопы	Средний запас, Бк/м ²	Стандартное отклонение, Бк/м ²	Коэффициент вариации, %	Доверительный интервал среднего (для достоверности 90%), Бк/м ²
¹³⁷ Cs	4913.6	1362.5	27.7	±409.2
²¹⁰ Pb _{ex}	3342.3	1363.7	40.8	±409.5

Территория Ставропольской возвышенности была затронута радиоактивным выпадением после Чернобыльской аварии в 1986 г. [30]. Более точно долю Чернобыльского ¹³⁷Cs в суммарных запасах изотопа удалось установить, анализируя результаты обработки образцов из разреза 1. Изначально разрез был заложен с целью выяснения геологического строения, содержания радиоизотопов и примерной стратиграфии овражных наносов, слагающих террасовидную поверхность в днище в 10 м ниже вершины свежего донного вреза (рис. 1 Б). Детальное описание разреза позволяет утверждать, что террасовидная поверхность образовалась одновременно при сходе оползня, переместившего материал с борта оврага в его днище. На это указывают морфология псевдотеррасы (неровная поверхность с обратным уклоном к борту оврага, имеющему хорошо выраженный циркообразный уступ, параллельный тыловому шву) и состав слагающих ее отложений (массивный тяжелый суглинок, подстилаемый тонкослоистой глиной), резко отличающийся от делювиально-пролювиальных наносов заполнения днища (грубослоистые легко- и среднесуглинистые разности со значительным количеством грубообломочных включений и линзами песка и гравийно-галечного материала) (рис. 2 А).

Общие запасы ¹³⁷Cs (1490 Бк/м²) и ²¹⁰Pb_{ex} (1660 Бк/м²) в разрезе 1 оказались значительно меньше величины их атмосферного выпадения (рис. 2 А, табл. 1). Это может свидетельствовать об эродированности данной поверхности или о сравнительно коротком времени ее экспозиции. На приведенной диаграмме четко виден резкий экспоненциальный характер уменьшения концентрации обоих изотопов и сходная картина их глубинного распределения. Практически весь запас ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb_{ex} содержится в верхних 15 см разреза. Такая эпюра изотопов атмосферного происхождения характерна для ненарушенных участков [17]. Следов частичного размыва не было обнаружено ни на поверхности, ни при описании отложений. Предположение о недавнем оползневом событии выглядит наиболее обоснованным.

Молодость оползневого события и близкое положение вершины донного вреза позволили предположить, что оползень был вызван подмывом склона при регрессивном продвижении вершинного перепада. Средняя скорость регрессивного роста подобных образований в различных районах Европейской России составляет около 1 м/год [1, 4 и др.], что дает приближенную дату оползневого события около 1983 г. Вычисления с использованием полученной величины среднегодового выпадения ²¹⁰Pb_{ex} и характеристики его распада дали близкие показатели – 1975–1980 гг. К этому моменту выпадение глобального ¹³⁷Cs уже практически прекратилось [17]. Следовательно, весь запас ¹³⁷Cs в отложениях разреза 1 связан с выпадением радиоизотопов после Чернобыльской аварии в апреле 1986 г. Запас изотопа в разрезе 1 равен примерно 30% его суммарного выпадения (табл. 1), что соответствует установленной ранее средней величине привноса Чернобыльского ¹³⁷Cs для данной территории [30].

Определение характерных концентраций радиоизотопов для различных источников наносов. Характеристики использованных в исследовании радиоактивных изотопов в грунтах различных наносопоставляющих геоморфологических элементов исследуемого водосбора представлены в табл. 2. Для большинства рассматриваемых источников наблюдаются значимые различия от остальных по тем или иным из при-

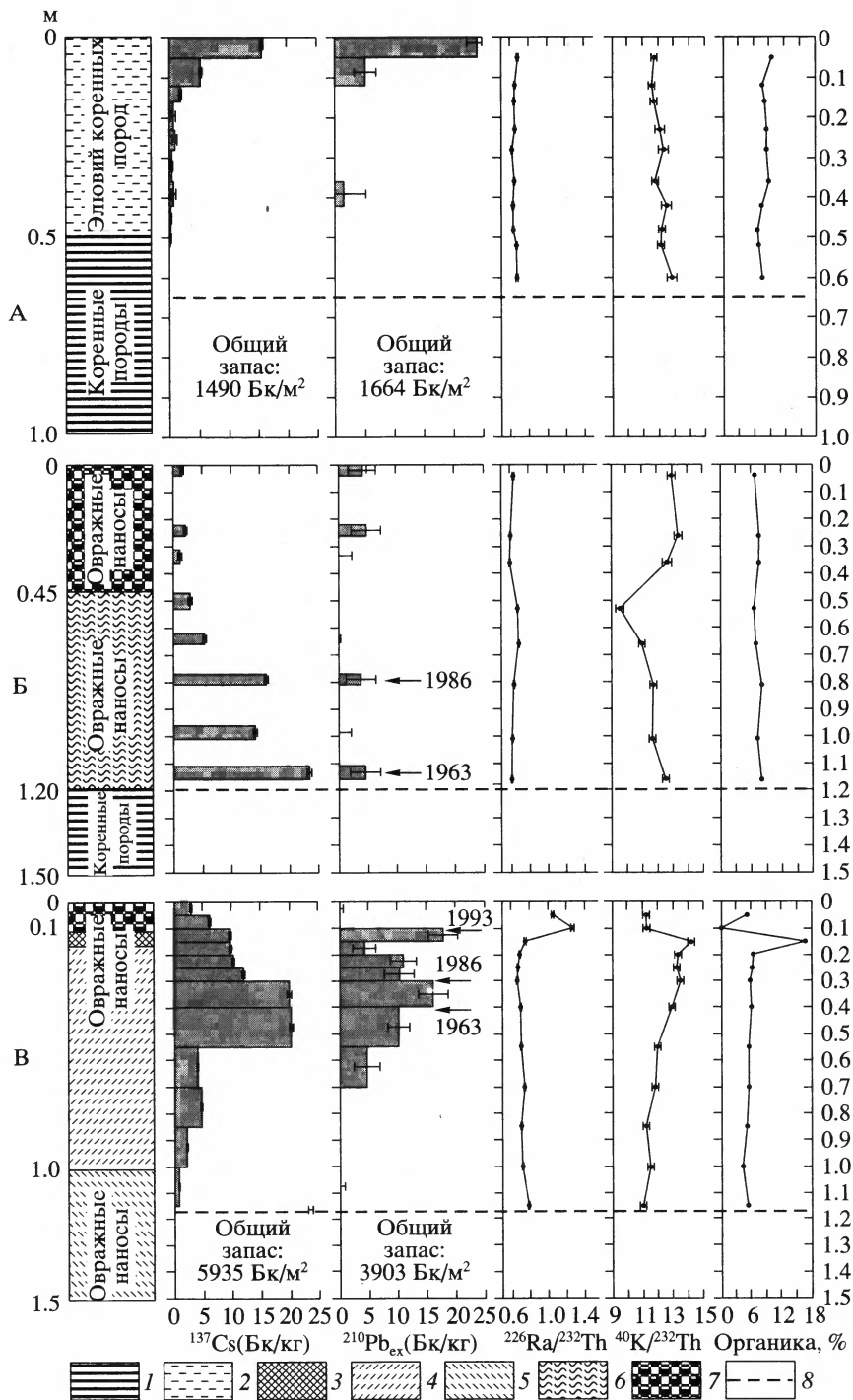


Рис. 2. Колонки отложений, результаты анализов и стратиграфия разрезов 1 (А), 2 (Б) и 3 (В)
 1 – темно-бурая тонкослоистая глина; суглинок; 2 – желтовато-бурый тяжелый, 3 – темно-серый гумусированный, 4 – серый алевритистый, 5 – темно-бурый опесчаненный с гравием; 6 – линзы и прослои песка и суглинка с гравием; 7 – гравий с суглинистым заполнителем; 8 – глубина опробования

Характерные концентрации радионуклидов (или их отношения) для различных источников наносов, Бк/кг

Радионуклиды	Почва на водосборе (поверхностный слой ≈2 см)	Почва на водосборе (средняя в слое ≈25 см)	Борта донного вреза (в овражных наносах)	Тальвег донного вреза	Борта донного вреза (в коренных породах)	Борта прорыва дамбы
^{137}Cs , Бк/кг	56.1 ± 0.1	13.2 ± 0.3	1.0 ± 0.2	1.5 ± 0.2	2.6 ± 0.3	0.0 ± 0.1
$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, Бк/кг	56.2 ± 4.3	8.9 ± 2.6	1.2 ± 2.5	0.0 ± 3.9	3.1 ± 2.8	0.0 ± 2.9
$^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.1	1.2 ± 0.1
$^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$	12.5 ± 0.3	9.6 ± 0.2	13.5 ± 0.3	7.2 ± 0.1	12.1 ± 0.3	7.0 ± 0.1

веденных в таблице характеристик. Слабо различаются концентрации изотопов в бортах свежего донного вреза, сложенных свежими овражными наносами, и более древними отложениями. Это, скорее всего, обусловлено недостаточной протяженностью путей переноса наносов и незначительными физическими и химическими изменениями вещества в пределах оврага.

Наибольшие концентрации радионуклидов атмосферного происхождения характерны для поверхностного слоя почвы на незэродированной части водосбора, а наименьшие значения, как для ^{137}Cs , так и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, – для материала бортов прорыва дамбы, то есть коренных пород. Здесь же отмечен максимум отношения концентраций $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ (1.2 ± 0.1). Минимум этого соотношения (0.5 ± 0.1) наблюдается в образцах из активно эродируемого тальвега свежего донного вреза оврага. Для отношения концентраций $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ наименьшие значения (7.0 ± 0.1) характеризуют борта прорыва дамбы, а максимум (13.5 ± 0.3) – борта свежего донного вреза, выработанные в молодых овражных наносах.

Стратиграфия отложений приустьевой части оврага и конуса выноса. Детальное стратиграфическое расчленение овражных отложений проводилось на основании анализов образцов из разрезов 2–5. Основные данные получены по разрезам 2 и 3 (рис. 2 Б, В), разрезы 4 и 5 имели вспомогательное значение для определения распространения вверх по оврагу зон переотложения наносов на различных этапах развития вторичного вреза (рис. 3).

Разрез 2 глубиной 1.5 м был заложен в пролювиальных отложениях, заполняющих прудок в низовьях оврага, непосредственно выше дамбы (рис. 1 Б). В связи с ограниченными возможностями транспортировки и лабораторной обработки образцов, из данного разреза были проанализированы образцы только отдельных интервалов глубин, а не послойная колонка (рис. 2 Б). Разрез 3 глубиной 1.5 м располагался на конусе выноса оврага, в пределах зоны современной аккумуляции ниже прорыва дамбы (рис. 1 Б, 2 В). Разрезы 4 (глубина 0.8 м) и 5 (глубина 0.7 м) были заложены в днище нижней части оврага примерно в 100 и 150 м выше устья соответственно (рис. 1 Б).

Результаты анализов позволили расчленить отложения нижней части оврага на слои, соответствующие трем временным интервалам: 1954–1963 гг., 1963–1986 гг. и 1986–1994 гг. Для датирования использовались следующие независимые источники информации: начало выпадения (1954 г.) и пики концентрации (1963 и 1986 гг.) ^{137}Cs ; возраст наносов по запасу $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ в слое, вычисленный исходя из его ежегодного выпадения, полученного по формуле (1); даты выпадения наиболее выдающихся ливней. Возраст прорыва дамбы независимо был оценен дендрохронологическим методом по возрасту тамариска, выросшего в тальвеге вреза.

Максимумы концентрации ^{137}Cs в эпохах его вертикального распределения, соответствующие 1963 г., вскрыты в разрезах 3 и 2. При этом в разрезе 2 этот пик залегает непосредственно у нижней границы овражных наносов, что свидетельствует об отсутствии заметной аккумуляции в устье оврага до 1963 г. (рис. 2 Б). В то же время, на конусе выноса (разрез 3) отложилась толща наносов мощностью не менее 75 см. Из них нижние 45 см (глубины 1.15–0.7 м), вероятно, накопились за одно эрозионное



Рис. 3. Продольный профиль детально обследованной части оврага и реконструированные объемы эрозии и аккумуляции в разные этапы развития
 1 – современный тальвег; 2 – дноще оврага; реконструированная поверхность: 3 – 1986 г., 4 – 1963 г.; 5 – дамба

событие, о чем свидетельствует отсутствие $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ в данном интервале (рис. 2 В). Вероятно, с ним связано формирование большей части современного вторичного вреза. Исходя из глубинного распределения ^{137}Cs , это событие произошло между 1954 и 1963 гг. Приблизительная дата по $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ – 1955–1960 г. Судя по данным об осадках, наиболее дождливыми были весенне-летние периоды 1958–1961 гг., что позволяет уверенно датировать значительное эрозионное событие, давшее начало вторичной активизации эрозии в овраге, концом 50-х – началом 60-х гг. Верхние 30 см до пика 1963 г. в разрезе 3 накопились постепенно и соответствуют этапу медленного регрессивного отступления вреза. Относительные концентрации литогенных радиоизотопов свидетельствуют о двух основных источниках наносов: продуктах размыва дна вследствие развития вторичного вреза и материала, смытого с водосборной площади оврага. Доля последнего особенно заметна в накоплениях первого кратковременного эпизода аккумуляции (рис. 2 В, табл. 2). В разрезах 4 и 5 пик концентрации ^{137}Cs , соответствующий 1963 г., вскрыт не был, так как глубина пробоотбора была недостаточной (рис. 3). Об этом свидетельствуют низкие измеренные запасы ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (2199 Бк/м² и 2964 Бк/м² в разрезе 4, 2987 Бк/м² и 2493 Бк/м² в разрезе 5 соответственно) при отсутствии следов размыва.

В период между 1963 и 1986 гг. значительных эрозионных событий, по-видимому, не наблюдалось. Продолжался постепенный регрессивный рост донного вреза. Основная зона аккумуляции сместилась с конуса выноса в приустьевую часть дна оврага (разрез 2), где за этот период накопилось ≈ 35 см наносов. На происхождение этих отложений указывают близкие значения относительных концентраций $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ в отложениях этой толщи и эродируемых бортов свежего вреза (рис. 2 Б, табл. 2). Выше по оврагу, на участках разрезов 4 и 5, в этот период аккумуляровалось не менее 70 и 40 см наносов соответственно. На конусе выноса (разрез 3) суммарная аккумуляция за этот промежуток времени не превышала 10 см, что видно из наложения в разрезе пиков концентрации ^{137}Cs 1963 и 1986 гг. (рис. 2 В).

После сооружения в 1986 г. дамбы в устьевой части оврага, началось активное заполнение наносами образовавшегося прудка. Судя по характеру отложений в разрезе 2 (грубослоистый суглинисто-супесчаный материал с линзами песка и включениями гравия и гальки – 0.8–0.45 м, гравийно-галечная смесь с суглинисто-супесчаным заполнителем – 0.45–0 м), отсутствию $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ на глубинах 0.8–0.4 м и резкому изменению относительных концентраций литогенных радиоизотопов (в особенности $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$) на глубине 0.4–0.5 м (рис. 2 Б), нижняя пачка накопилась вскоре после сооружения дамбы в течение одного эрозионного события. Вероятно, к моменту прорыва прудок был уже заполнен наносами более чем на треть, что значительно сократило его емкость. Аккумуляция также распространялась и выше по днищу оврага. После 1986 г. в разрезе 4 накопилось ≈ 10 см, а в разрезе 5 ≈ 30 см наносов (рис. 3).

Прорыв дамбы произошел в результате перелива в месте ее сочленения с левым бортом оврага, причем в основном размывалась не сама дамба, а непосредственно коренной склон. Ниже вреза образовался четко выраженный в рельефе шлейф свежих наносов в северной части конуса выноса (рис. 1 Б). Мощность этого слоя в разрезе 3 составляет ≈ 30 см. Исходя из анализа вертикального распределения радиоизотопов, его можно разделить на три части, соответствующие двум эпизодам интенсивной аккумуляции и периоду относительной стабилизации поверхности. Последнему соответствует богатый органикой прослой на глубине 10–15 см с пиком содержания $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (рис. 2 В). Оценка возраста отложений по $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ позволяет датировать прорыв дамбы примерно 1986–87 гг. Следует учитывать определенную долю привноса изотопа с аккумуляруемыми наносами, завышающую возраст отложений при нашем методе расчета. Данная оценка свидетельствует в пользу установления даты прорыва дамбы вскоре после ее постройки. Толща мощностью 15–20 см накопилась очень быстро, вероятно в течение одного-двух эрозионных событий, связанных непосредственно с прорывом дамбы. Независимое датирование начала периода стабилизации поверхности было проведено по годовым кольцам куста тамариска, росшего в днище прорыва дамбы (возраст 4 года от 1993 г. дает 1989 г.). Таким образом, прорыв дамбы произошел между 1986 и 1989 гг. Наиболее вероятная дата этого события согласно метеорологическим данным, 7–8 июля 1987 г., когда менее чем за двое суток выпало в общей сложности более 90 мм осадков. Относительное содержание литогенных радиоизотопов показывает, что в диапазоне глубин 10–30 см, наряду с непосредственным поступлением материала из прорыва, переоткладывались и наносы из оврага, сформировавшиеся в результате продолжающегося роста донного вреза (рис. 2 В).

Богатый органикой прослой с пиком концентрации $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ перекрывается 10-сантиметровым слоем свежих наносов, не содержащим инструментально определяемых концентраций $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (рис. 2 В). Этот слой сформировался в результате одного эрозионного события незадолго до момента отбора образцов. Наиболее вероятными датами этого события, исходя из метеорологических данных, являются 6 августа 1993 г., когда выпало 22.5 мм осадков, и 13 августа (21.2 мм). Значительная доля материала из прорыва дамбы, установленная по соотношениям $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ и $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$, свидетельствует о его продолжающемся росте. Этот вывод подтвердился при повторной теодолитной съемке 1994 г., которая показала, что вершина прорыва приросла за год более чем на 1 м.

Основные этапы развития оврага за последние 50 лет. На основании детальной стратиграфии пролювиальных отложений с 1954 г., представленной выше, реконструируется общая картина развития оврага в этот период. К началу 50-х годов XX века приостановился рост оврага в длину и процессы глубинной эрозии, хотя продольный профиль и не был выработан. Это было связано с достижением оврагом предельной длины и изменением баланса наносов, когда основным источником рыхлого материала стали продолжавшие развиваться борта оврага. Аналогичную ситуацию с преобладанием склоновых процессов в изменении его объема и формировании стока наносов на стадии затухания линейного роста отмечают многие российские и зарубежные исследователи [31–34]. Перенос поступающего с бортов материала в этот

период носил преимущественно локальный характер, о чем свидетельствует заполнение днища оврага наносами на всем его протяжении. Основными процессами в развитии бортов были оплывенно-оползневые в сочетании с делювиальным смывом и бороздковой эрозией, при этом роль последних двух процессов уменьшалась по мере развития растительности. Следы наиболее крупных оползней до сих пор четко выражены в морфологии бортов оврага. Этап заполнения днища, снижения крутизны и зарастания склонов продолжался, исходя из стратиграфии пролювия в разрезах, до конца 1950-х годов, а верхняя часть оврага, которой еще не достиг вторичный врез, находится в стабильном состоянии и в настоящее время.

Неравномерная аккумуляция наносов по длине днища оврага не могла не привести к достижению критического уклона на том или ином участке продольного профиля, что создало предпосылки для активизации эрозионных процессов. Собственно возникновение вторичного вреза связано с эрозионным событием редкой повторяемости, приведшим к образованию значительной части его современной длины. Об этом свидетельствует единовременное формирование не менее 45-сантиметровой толщи наносов в разрезе 3 на наиболее молодой части конуса выноса (рис. 2 В, 3). Наиболее вероятным представляется начало врезания на выпуклом участке продольного профиля выше современного положения дамбы (рис. 3). Примерное датирование события – между 1958 и 1960 гг., исходя из совместного анализа стратиграфии по ^{137}Cs (период 1953–1963 гг.), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (период 1955–1960 гг.) и данных по осадкам (1958–1961 гг.).

В дальнейшем рост вторичного вреза происходил постепенно, о чем свидетельствуют относительно низкие темпы аккумуляции наносов в приустьевой части оврага и на конусе выноса. Основная часть эродируемого материала в период с 1963 по 1986 гг. не достигала конуса выноса оврага (на участке разреза 3 отложилось не более 10 см) и аккумуляровалась в расширении нижней части днища оврага (≈ 35 см в разрезе 2, более 70 см в разрезе 4 и не менее 40 см в разрезе 5) (рис. 2, 3). При этом частично заполнялся уже существовавший вторичный врез в его нижней части, и формировался четко выраженный выпуклый поперечный профиль днища со своеобразными “прирусловыми валами” – зонами наиболее активной аккумуляции вдоль русла временного водотока. Учитывая небольшую площадь аккумулятивной части днища (рис. 1 Б) и неравномерный характер осадконакопления (выклинивание от тальвега к бортам оврага), общий объем переотложенного материала можно приблизительно оценить как не более 400 м^3 . Это превышает объем активно эродируемой части донного вреза, что свидетельствует о значимой доле поступления материала с бортов оврага. В определенных условиях, вероятно, имело место также поступление наносов в результате активизации эрозии на водосборе. Регрессивный рост вторичного вреза в днище оврага продолжается и в настоящее время. Реконструированные положения тальвега оврага и аккумулятивных толщ в его нижней части за период с конца 1950-х гг. показаны на рис. 3.

После постройки дамбы в нижней части оврага в 1986 г. началось быстрое заполнение наносами образовавшегося прудка. Наиболее интенсивная аккумуляция происходила непосредственно выше дамбы, в районе разреза 2 (≈ 80 см), но распространялась и более чем на 100 м вверх по течению (≈ 10 см в разрезе 4–70 м выше дамбы; ≈ 30 см в разрезе 5–110 м выше дамбы) (рис. 3). Вскоре после возведения дамба была прорвана. Наиболее вероятной датой данного события, исходя из стратиграфии отложений по атмосферным радионуклидам, данных об осадках и дендрохронологической оценки, можно считать 6–8 июля 1987 г. В результате прорыва в месте сочленения дамбы с северным коренным склоном образовался врез длиной ≈ 50 м и средней глубиной ≈ 2.5 м (на 1994 г.). Постепенный регрессивный рост вторичного вреза в днище оврага в этот период продолжался. Большая часть наносов при этом аккумуляровалась в прудке выше дамбы, но определенная часть транспортировалась и на конус выноса через прорыв (рис. 2 Б, 2 В, 3).

Таким образом, непосредственное антропогенное вмешательство в развитие оврага (полное перегораживание дамбой его устья) повлияло на характер и интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов в его приустьевой части, но не изменило основную тенденцию развития – рост вторичного вреза с переработкой заполнения днища и транспортом материала в нижнюю часть оврага. Это показывает, что для прекращения линейной эрозии по всей длине оврага недостаточно искусственной стабилизации его устья, как предлагают некоторые авторы [35, 36].

Кроме того, представляется важным выявленная смена положения зоны максимальной аккумуляции в зависимости от интенсивности эрозионного события. В условиях эпизодов относительно небольшого стока частой повторяемости, материал отлагался преимущественно в расширенной нижней части оврага и не достигал конуса выноса. Вероятно, на поздних стадиях развития оврага только значительные события редкой повторяемости приводят к выносу рыхлого материала за его пределы, тогда как относительно незначительные эпизоды стока дестабилизируют борта оврага (или вторичного вреза), подготавливают материал к выносу и осуществляют его локальное перераспределение между различными участками днища. Хотя данный вывод на первый взгляд представляется очевидным, его важность заключается в том, что предлагаемые методы позволяют количественно оценить роль эрозионных событий различной повторяемости в общем выносе наносов из овражной системы. Альтернативой является только анализ многолетних рядов прямых наблюдений за стоком воды и наносов, что крайне трудоемко. Именно количественные данные об эрозионном вкладе событий редкой повторяемости необходимо использовать при проектировании и сооружении инженерных сооружений, подобных дамбе, построенной в обследованном овраге.

Выводы

Опыт применения радиоактивных трассеров перемещения наносов для изучения детальной стратиграфии современных пролювиальных отложений показывает, что предлагаемый подход является важным дополнением к существующему арсеналу методов исследования развития оврагов. Одновременное использование радиоизотопных и стандартных методов (морфологическое и морфометрическое описание, повторные геодезические съемки, анализ разновременных карт и аэрофотоснимков) позволяет на основании одного полевого выезда: а) выделить этапы в развитии малой эрозионной формы; б) количественно оценить соответствующие им объемы аккумуляции; в) определить (с различной степенью точности в зависимости от детальности опробования) баланс наносов; г) выявить вклад различных источников сноса. Наличие детальных метеорологических данных на территорию исследований расширяет диапазон решаемых задач и частично заменяет редко доступные ряды срочных наблюдений о стоке воды и наносов. Кроме того, заслуживает внимания открывающаяся возможность калибровки различных моделей роста оврагов. Ее можно проводить, используя результаты рассмотренного комплекса методов, дополненных цифровой моделью рельефа, быстрое создание которой возможно при применении современных геодезических приборов и ГИС-технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миронова Е.А., Сетунская Л.Е.* Некоторые результаты изучения интенсивности роста оврагов на Приволжской возвышенности // Геоморфология. 1974. № 3. С. 74–82.
2. *Веретенникова М.В.* Механизм овражной эрозии и динамика русловых форм // Геоморфология. 1998. № 2. С. 66–75.
3. *Рыжов Ю.В.* Овражная эрозия в межгорных котловинах юго-западного Прибайкалья // Геоморфология. 1998. № 3. С. 85–91.
4. *Рысин И.И.* О современном тренде овражной эрозии в Удмуртии // Геоморфология. 1998. № 3. С. 92–101.

5. Лисицына К.Н. Изучение стока наносов в первичной гидрографической сети // Тр. ГГИ. 1963. Вып. 100. С. 122–135.
6. Seginer I. Gully development and sediment yield // J. Hydrology. 1966. № 4. P. 236–253.
7. Рожков А.Г. Борьба с оврагами. М.: Колос, 1981. 199 с.
8. Веретенникова М.В., Беляев В.Р. Результаты стационарных наблюдений за стоком воды и наносов в склоновом овраге // Збірник праць Межвузівської Ради проблем ерозійних, руслових та гирлових процесів “Стационарні та експериментальні дослідження сучасного рельєфоутворення”. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2000. С. 18–23.
9. Сидорчук А.Ю. Антропогенная овражная эрозия и термоэрозия в западной части центральной Ямала // Геоморфология. 2000. № 3. С. 95–103.
10. Зорина Е.Ф., Любимов Б.П., Морякова Л.А. и др. История и прогноз развития оврага, исследованного в конце XIX в. Э.Э. Керном // Геоморфология. 1984. № 3. С. 54–59.
11. Beavis S.G., Zhang L., Jakeman A.J., Gray S.D. Erosional history of the Warrah catchment in the Liverpool Plains, New South Wales // Hydrological Processes. 1999. V. 13. P. 753–761.
12. Vandekerckhove L., Muys B., Poesen J. et al. A method for dendrochronological assessment of medium-term gully erosion rates // Catena. 2001. V. 45. P. 123–161.
13. Морякова Л.А. Зарастание оврагов и формирование почв на их склонах // Эрозия почв и русловые процессы. 1979. Вып. 7. С. 101–108.
14. Loughran R.J. The use of the environmental isotope caesium-137 for soil erosion and sedimentation studies // Trends in Hydrol. 1994. № 1. P. 149–167.
15. Higgitt D.L., Froehlich W., Walling D.E. Applications and limitations of Chernobyl radiocaesium measurements in a Carpathian erosion investigation // Land Degrad. Rehabil. 1992. № 3. P. 15–26.
16. Голосов В.Н. Использование радионуклидов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
17. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 220 p.
18. Wise S.M. Caesium-137 and Lead-210: a review of the techniques and some applications in geomorphology // Timescales in Geomorphology (Ed. by Cullingford R.A., Davidson D.A., Lewin J.). J. Wiley and Sons Ltd., 1980. P. 109–127.
19. Appleby P.G., Oldfield F. Application of lead-210 to sedimentation studies // Uranium-series disequilibrium: Application to earth, marine and environmental sciences (Ed. by M. Ivanovich, R.S. Harman). Clarendon Press, Oxford, UK. 1992. P. 731–738.
20. Walling D.E., He Q. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land // Soil Sci. Soc. Am. J. 1999. V. 63. P. 1404–1412.
21. Беляев В.Р. Использование цезия-137 (Cs-137) и свинца-210 (Pb-210) как трассеров для изучения современных эрозионно-аккумулятивных процессов на сельскохозяйственных землях // Динамика потоков и эрозионно-аккумулятивные процессы (м-лы семинара молодых ученых вузов, объединяемых советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Вологда, 2000). М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 18–23.
22. Murray A.S., Stanton R., Olley J.M., Morton R. Determining the origins and history of sedimentation in an underground river system using natural and fallout radionuclides // J. of Hydrology. 1993. V. 146. P. 341–359.
23. Olley J.M., Murray A.S., Mackenzie D.H., Edwards K. Identifying sediment sources in a gullied catchment using natural and anthropogenic radioactivity // Water Resources Research. 1993. V. 29. № 4. P. 1037–1043.
24. Климатологический справочник СССР. Том 13. Северо-Кавказская гидрометеорологическая служба, 1990.
25. Sidorchuk A.Yu., Golosov V.N. The history of erosion on the Northern Ponto-Meotian during the period of intensive agriculture // Proceeding of workshop on Soil Erosion in semiarid Mediterranean areas. Roma. 1995. P. 161–173.
26. Леднева К.В., Меццарская А.В. Многолетние ряды месячных сумм осадков, осредненных по площади, для сельскохозяйственных районов СССР / О.А. Дроздов. М.: Гидрометеиздат, 1977. 157 с.
27. Цветков М.А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия до 1914 г. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 213 с.
28. Ясунский В.К. Изменения в распределении землепользования в Европейской России с конца XVIII века до Первой мировой войны // Вопросы сельского хозяйства, крестьянства и революционных движений в России. М.: Наука, 1978. С. 113–149.
29. Murray A.S., Marten R., Johnston A., Martin P. Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental levels by gamma spectrometry // J. Radiat. Nucl. Chem. 1987. V. 115. P. 263–288.
30. Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины / Ю.А. Израэль. М.: Росгидромет – Роскартография, 1998. 142 с.

31. Косов Б.Ф., Любимов Б.П. Оценка деформаций овражных склонов гравитационными процессами для прогнозирования роста оврагов // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1979. Вып. 7. С. 90–100.
32. Blong R.J., Graham O.P., Veness J.A. The role of sidewall processes in gully development; some N.S.W. examples // Earth Surface Processes and Landforms. 1982. № 7. P. 381–385.
33. Crouch R.J. Erosion processes and rates for gullies in granitic soils. Bathurst, New South Wales, Australia // Earth Surface Processes and Landforms. 1990. V. 15. P. 169–173.
34. Зорина Е.Ф. Этапы в развитии оврагообразовательного процесса // XV Плен. межвуз. координ. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Волгоград: Перемена, 2000. С. 97–98.
35. Скоморохов А.И. О двух тенденциях в развитии овражно-балочного рельефа и возможностях противозерозионной защиты почв // Геоморфология. 1984. № 1. С. 103–111.
36. Кравченко Р.А. Аккумулятивный процесс в развитии овражных систем // Геоморфология. 2000. № 2. С. 12–18.

Московский государственный университет
 Географический факультет

Поступила в редакцию
 07.04.2003

AN EMPLOYMENT OF RADIOISOTOPES FOR RECONSTRUCTION OF RECENT GULLIES DEVELOPMENT STAGES

V.R. BELYAEV, V.N. GOLOSOV, A.YU. SIDORCHOUK, P.J. WALLBRINK, E.S. MURRAY

S u m m a r y

Authors suggest new method of gully history reconstruction for the last 50 years, based on ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ -dating of proluvium. The application of this method to a certain gully investigation together with a traditional geologic-geomorphologic studies has allowed to determine the thickness of the gully deposits, to fulfill their detailed stratification, to reveal the main events of the gully development during the period under consideration. The comparison with the data on land-use and precipitation has helped to suggest possible causes of these events.

УДК 551.4.012:551.435.162(470.1/.6)

© 2005 г. И.И. НИКОЛЬСКАЯ, С.Д. ПРОХОРОВА

КАРТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ¹

Картографический метод является одним из основных при изучении особенностей распространения оврагов в различных регионах страны. Он позволяет дать общее представление о разных аспектах оврагообразовательного процесса: его последствиях, вероятности развития во всем многообразии природных условий, под влиянием разной степени антропогенной нагрузки на естественные ландшафты.

Суть картографического метода, согласно К.А. Салищеву [1], состоит во включении в процесс исследования промежуточного звена – географической карты, как модели изучаемых явлений. При этом карта выступает в двойной роли: в качестве средства исследования и как его предмет в виде модели, заменяющей собой реальное явление, непосредственное изучение которого невозможно или затруднено. А.М. Берлянт [2] вводит понятие картографического моделирования – создание, анализ и преобразование картографических произведений, рассматриваемых как модели реальных объектов и процессов с целью их использования для приобретения новых знаний об этих объектах и процессах.

В приложении к изучению овражной эрозии карта выступает как источник сведений о предмете. При этом, поскольку овраг является специфической формой рельефа,

¹ Работа выполнена по программе поддержки ведущих научных школ России (проект № НШ – 1443.2003.5).