

ОЦЕНКА ЛИНЕЙНОГО И ПЛОЩАДНОГО ПРИРОСТА ОВРАГОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ (НА ТЕРРИТОРИИ УДМУРТИИ)

© 2021 г. И. И. Григорьев^{1,*}, И. И. Рысин^{1,**}

¹ Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*E-mail: ivangrig@yandex.ru,

**E-mail: rysin.iwan@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.09.2020 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 09.04.2021 г.

Основная цель исследований – выявление связи между линейным и площадным приростом оврагов разных типов в зависимости от их морфолого-морфометрических особенностей и гидрометеорологических условий. Для мониторинга роста линейных и площадных параметров оврагов на сельскохозяйственных землях за период с начала 2000-х до 2017 г. применялись следующие методы: плановая геодезическая съемка вершинной части оврагов (совместно с их бровками и тальвегами) и построение поперечных профилей с помощью электронного тахеометра. Использовались данные трех ближайших метеостанций и гидропостов. Обследованы 6 ключевых участков оврагов четырех различных типов (приводораздельного, придолинного, вершинного и донного), где их водосборные площади заняты пахотными угодьями, используемыми под посевы зернобобовых и кормовых культур. Максимальные размывы наблюдались для двух оврагов в 2001 г., когда линейные приросты вершин варьировали в пределах 2.3–21.8 м, а площадные, соответственно – от 23.1 до 436.7 м². Устойчивая зависимость между линейным и площадным приростом ($r = 0.567–0.832$) выявлена для 5 из 6 исследованных оврагов. В большинстве случаев установлена отчетливая зависимость между рассматриваемыми показателями, что наиболее характерно для донного одновершинного оврага и приводораздельного, растущего тремя вершинами ($r = 0.832$). Высокая степень связи обнаружена и у придолинного одновершинного оврага на правом склоне долины р. Вятка ($r = 0.790$), размывающего перигляциальный аллювий в пределах населенного пункта. Умеренная связь отмечена у приводораздельного одновершинного ($r = 0.569$) и техногенного трехвершинного оврагов ($r = 0.567$), развивающихся на разных ключевых участках правобережья Камы. Не обнаружена связь только у одного вершинного оврага, растущего в верховьях днища голоценовой балки тремя вершинами ($r = 0.269$), что объясняется техногенным перераспределением стока на распаханном водосборе оврага. Выявлено плавное изменение по годам площадного прироста и достаточно резкое колебание величин линейного прироста вершин оврагов, независимо от типа и их морфолого-морфометрических особенностей. Зависимость их ежегодного прироста от условий землепользования на водосборе и их морфолого-морфометрических особенностей не установлена. Лишь у двух оврагов обнаружена существенная связь площадного прироста за 2000–2016 гг. с интенсивностью снеготаяния и годовой суммой осадков и, соответственно, умеренная связь с интенсивностью половодного стока в створе ближайшей малой реки. Исследования показали, что талый сток перестал играть доминирующую роль в линейном и площадном приростах оврагов за рассматриваемый период.

Ключевые слова: рост оврагов, инструментальная съемка, мониторинг, корреляционный анализ, гидрометеорологические факторы

DOI: 10.31857/S0435428121030044

ВВЕДЕНИЕ

Овражная эрозия – один из активных рельефообразующих процессов, способствующий образованию отрицательных линейных форм и перемещению огромного количества материала, оказывающий влияние на русловой режим, заиление пойм рек и водохранилищ [1, 2]. Негатив-

ными последствиями овражной эрозии являются сокращение площадей пахотных земель, разрушение строений, коммуникаций и т.д. К основным причинам развития оврагов относятся нерациональное экстенсивное землепользование [3] и возрастающая из года в год техногенная нагрузка (строительство дорог и трубопроводов, изменения площадей водосборов оврагов при различно-

го рода деятельности, увеличение коэффициентов поверхностного стока, неконтролируемый сброс воды и т.п.) [4, 5].

Основной метод полевой оценки активности процессов овражной эрозии — это метод линейных измерений, среди всех остальных анализируемых методов наиболее простой и наименее затратный; преимуществом является также быстрота измерений. В его основу положено измерение расстояний от вершины оврага до предварительно установленного репера или нескольких реперов, расположенных по линии роста оврага, а также до деревьев, столбов и строений, либо от вершины оврага до специально заложённой марки [6–9].

В полевых условиях применяются визуальный и инструментальный методы. К визуальным относятся рекогносцировочные работы и качественная оценка изменений на исследуемых участках [10]. Они характерны для начальной стадии исследования и не позволяют количественно охарактеризовать динамику развития оврага. Современные полевые инструментальные методы позволяют с высокой точностью проводить измерения изменений параметров оврагов. Линейные измерения долгое время оставались основным и наиболее точным способом оценки линейного прироста вершин оврагов [11–13]; но этот метод, даже при использовании нескольких реперов, не позволяет с достаточной точностью судить о площадном и объемном приросте вершин. Поэтому его применение целесообразно только для оценки линейного прироста и выявления из нескольких выбранных для наблюдения оврагов наиболее активных и интересных для более детального изучения с наименьшими затратами времени и средств. Также он может быть использован в сочетании с более точными методами определения темпов и механизма роста оврагов на той или иной исследуемой территории.

Необходимо отметить, что сеть мониторинговых наблюдений за линейным приростом оврагов в Удмуртской Республике существует с 1978 г. Выбор ключевых участков для изучения темпов регрессивного отступления вершин активно растущих оврагов различного типа осуществлялся на основе детального анализа аэрофотоснимков, полученных по результатам съемок 1957–1959 гг. На момент начала мониторинговых наблюдений в 1978 г. овраги находились на различных стадиях развития, но все продолжали расти в длину. В первые годы проводились наблюдения за 120 вершинами оврагов [1]. В дальнейшем появившиеся на участках наблюдений новые овраги и активно растущие отвершки оврагов, уже входящих в систему мониторинга, также были включены в сеть наблюдений [14]. Одновременно сеть мониторинга расширялась за счет включения в нее овра-

гов на новых участках. В настоящее время в систему мониторинга на землях сельскохозяйственного назначения входят 168 вершин оврагов различного типа, которые находятся на 28 ключевых участках, расположенных в различных ландшафтных условиях Удмуртской Республики.

Поскольку ранее мы анализировали в основном развитие овражной эрозии на основе линейного прироста вершин оврагов, то в данной работе мы впервые публикуем результаты изучения линейного и площадного прироста наиболее активно растущих оврагов, полученных с применением инструментальных методов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах исследуемой территории распространены ландшафты южной тайги и подтаежной зоны, сильно преобразованные хозяйственной деятельностью. Краевые зоны междуречных пространств сложены лёссовидными делювиально-солифлюкционными суглинками, тогда как днища балок, прорезаемых донными оврагами — отложениями смытых с междуречных пространств наносов тяжелосуглинистого состава. Ряд придолинных и приводораздельных оврагов формируются в верхнепермских глинах, иногда с прослоями более прочных пород (известняков, мергелей, аргиллитов, песчаников и т.п.).

Для Удмуртии характерен умеренно теплый и влажный климат с продолжительной зимой и относительно коротким летом. Среднегодовая температура изменяется от +2,3°C на севере, до +3,5°C на юге. Средние температуры января и июля варьируют в пределах –13,3 – –11,9°C, и +18,3 – +19,7°C, соответственно, с выраженным трендом повышения зимних температур воздуха в зимние месяцы [15]. Устойчивый снежный покров держится 155–175 дней. Среднегодовая сумма осадков составляет 500–650 мм [16]. В связи с теплыми зимами уменьшается и глубина промерзания почв.

В 1955 г. площадь пашни в Удмуртии была максимальной, за последующие 35 лет (1955–1990 гг.) сокращение составило менее 3%, а после 1990 г. темпы сокращения обрабатываемых пахотных угодий (посевных площадей) увеличились и в интервале 1990–2010 гг. площадь их уменьшилась почти на четверть, составив 76,5% по отношению к 1990 г. При этом за последние 30 лет посевы зерновых культур во всех категориях хозяйств республики сократились с 739 тыс. га до 406 тыс. га и соответственно возросла площадь технических культур до 613 тыс. га [1, 17].

Начиная с 2000-х годов на ряде активно растущих оврагов нами проводятся ежегодные измерения площадного и объемного прироста их вершин (рис. 1). Здесь речь пойдет лишь о линейном

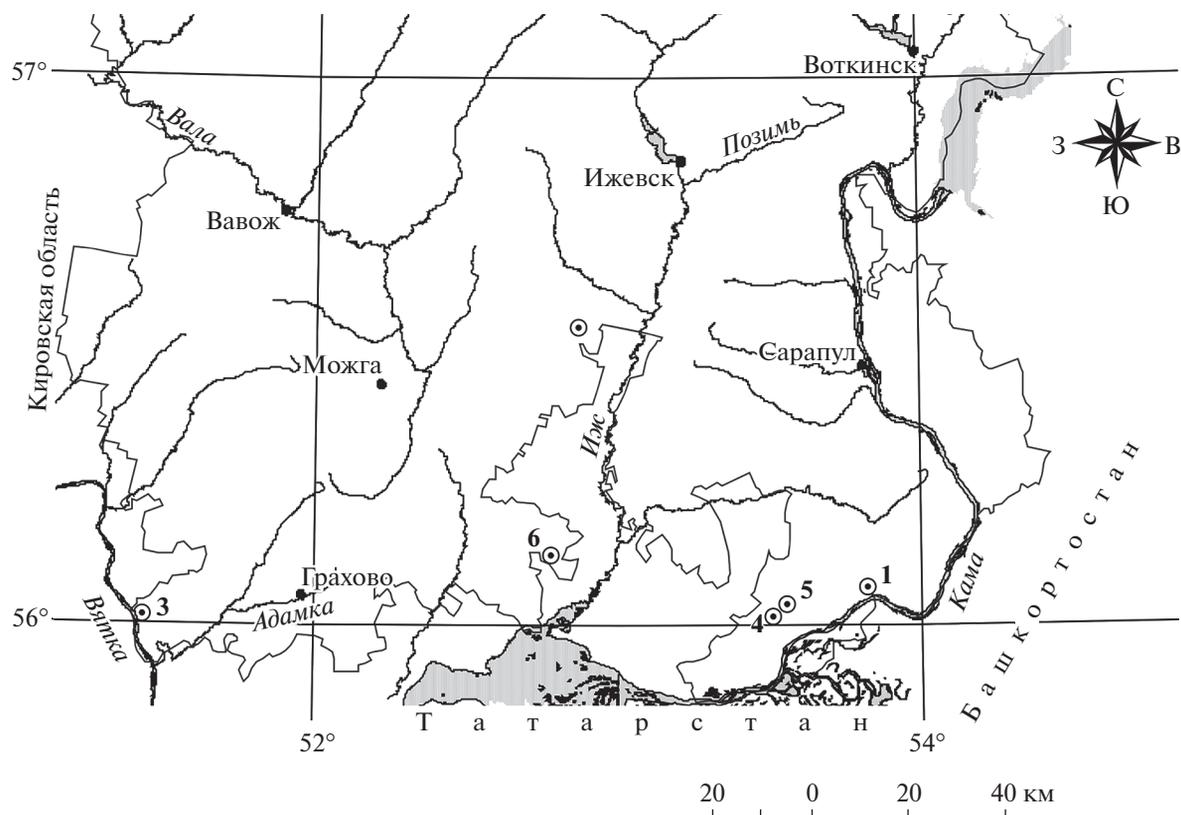


Рис. 1. Расположение ключевых участков по мониторингу линейного и площадного размыва различных типов оврагов в пределах территории Удмуртской Республики. Цифрами обозначены номера оврагов и ключевых участков.

и площадном приросте оврагов, данные же об объемном приросте оврагов будут опубликованы позднее. Выбор исследуемых шести оврагов обусловлен их активным ежегодным линейным и площадным приростом. На большинстве же других оврагов, где также использовалась тахеометрическая съемка их вершинных участков, с 2008–2010 гг. прирост по разным причинам прекратился или находился близко к нулевым значениям. Поэтому продолжать детальную съемку на них не было необходимости.

Морфометрические характеристики и координаты вершин шести активно растущих оврагов, где осуществлялась тахеометрическая съемка, представлены в табл. 1. Методика получения морфометрических показателей детально описана в нашей работе [1].

Приводораздельный овраг № 1 находится на ключевом участке “Вятское”, который расположен между населенными пунктами Вятское и Кухтино Каракулинского района в верховьях р. Северянки. Овраг растет одной языковидной вершиной (рис. 2а), глубина вершинного уступа в 2017 г. достигла 2.5 м, а ширина при вершине – 7.5 м.

Донный овраг № 2 находится в 700 м к СВ от северной окраины д. Курегово Малоपुरгинского района, в 35 км к ЮЗ от центра г. Ижевск. Длина днища размываемой балки на данном участке составляет около 400 м, площадь водосбора – 0.68 км², собственно самой балочной формы – 0.04 км². Средняя высота водосбора – 167 м (по данным топографической карты масштаба 1:25000), размах высот рельефа – 76 м [18]. Овраг имеет одну вершину (рис. 2б) и размывает балочный аллювий суглинистого механического состава. Глубина вершинного уступа варьирует в пределах 1.8–2.5 м, а ширина на расстоянии 3 м от вершины изменяется в последние годы незначительно – 5.2–5.6 м.

Придолинный овраг № 3 находится в с. Крымская Слудка Кизнерского района и размывает плейстоценовый перигляциальный аллювий террасы р. Вятка. Древний аллювий сложен опесчаненными желто-бурыми с палевым оттенком лёссовидными суглинками и легко размывается не только водами, текущими по оврагу, но и рекой (рис. 2в). Длина оврага в начале 2000 г. составляла около 120 м, в настоящее время в результате размыва рекой берегового уступа его длина сократилась до 35 м. Максимальная величина руслового

Таблица 1. Морфометрические характеристики активно растущих оврагов и их водосборов на ключевых участках в Удмуртии

Номер оврага, ключевой участок	Тип оврага*	Длина оврага, м	Кол-во вершин	Абс. отм. устья оврага, м	Абс. отм. вершины оврага, м	Падение оврага**, м	Средний уклон оврага, м/км	Длина линии стока, м	Абс. отм. водораздела, м	Ср. уклон линии стока, м/км	Ср. уклон склона, м/км	Глубина базиса эрозии, м	Площадь водосбора выше вершины оврага, га
№ 1 – “Вятское”, площадь – 2.2 км ² (Каракулинский р-н), координаты вершины оврага: 56°05'47.62" с.ш. 53°59'01.90" в.д.	ПВ	300	1	135	157	22	87	1120	186	26	37	51	16.5
№ 2 – “Курегово”, площадь – 2.4 км ² (Малопургинский р-н), координаты вершины оврага: 56°32'58.93" с.ш. 52°54'39.14" в.д.	Д	533	1	119	132	17	32	1100	195	57	49	76	24
№ 3 – “Крымская Слудка”, площадь – 3.2 км ² (Кизнерский р-н), координаты вершины оврага: 55°59'50.16" с.ш. 51°25'26.67" в.д.	ПД	120	1	53	87	34	25	1060	100	12	14	47	13.6
№ 4 – “Кулюшево-1”, площадь – 4.7 км ² (Каракулинский р-н), координаты вершины оврага: 56°03'51.20" с.ш. 53°34'44.46" в.д.	ПВ	520	3	125	160	35	67	780	197.5	48	56	83.5	18.8
№ 5 – “Кулюшево-2”, площадь – 4.9 км ² (Каракулинский р-н), координаты вершины оврага: 56°02'07.15" с.ш. 53°36'59.33" в.д.	ПВ (Т)	350	2	130	156	26	74	440	167	25	47	50	6.1
№ 6 – “Варзи-Ятчи”, площадь – 8.5 км ² (Алнашский р-н), координаты вершины оврага: 56°06'08.82" с.ш. 52°47'21.86" в.д.	В	215	3	102.5	106	3.5	16	1750	145	22	22	55	195

Примечание. * – Д – донный, ПД – придолинный, В – вершинный, ПВ – приводораздельный, ПВ (Т) – приводораздельный техногенного происхождения. ** – Падение оврага – перепад высот между вершиной и устьем оврага.

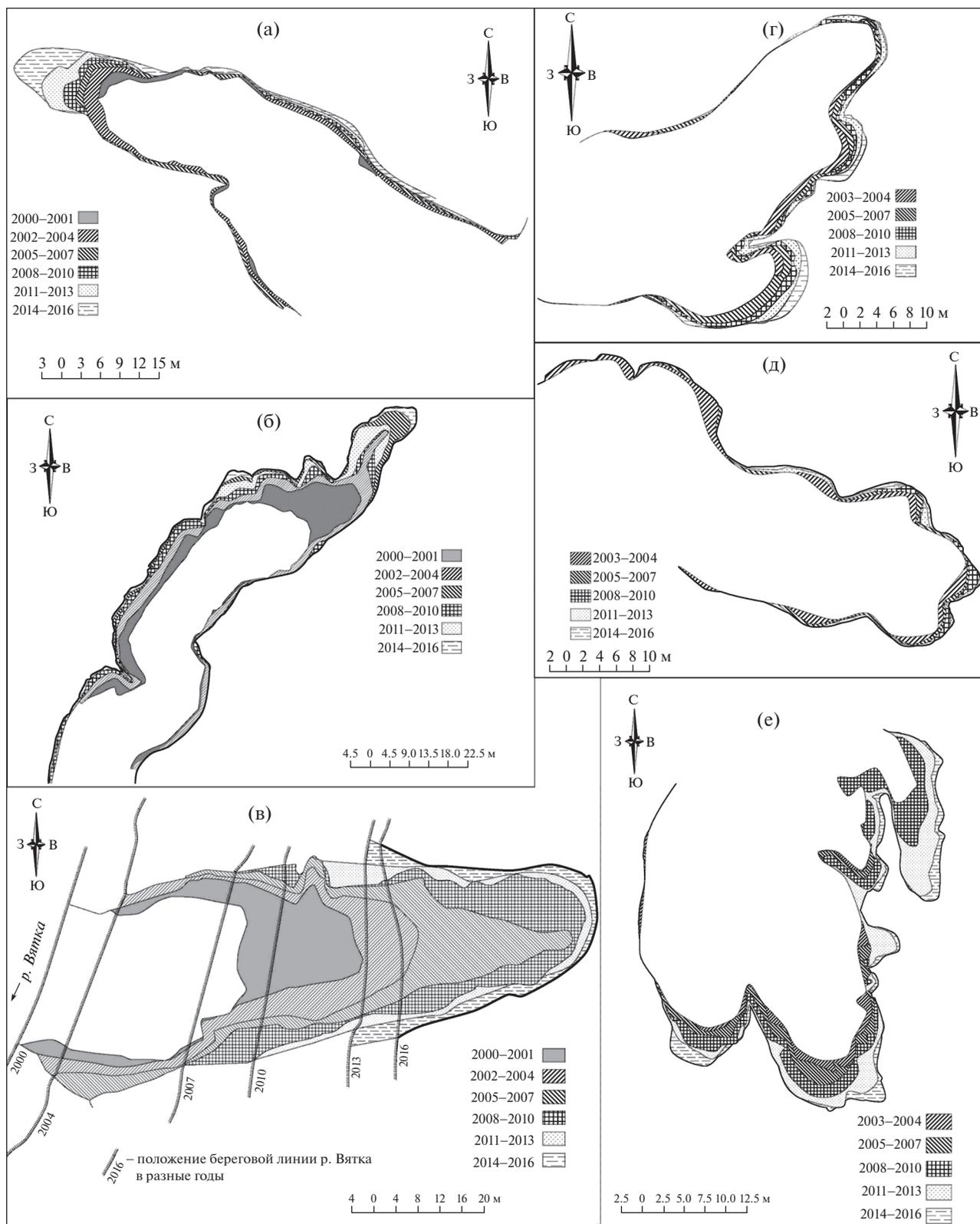


Рис. 2. Схемы линейного и площадного прироста верховьев оврагов: (а) – № 1 (2000–2016 гг.), (б) – № 2 (2000–2016 гг.), (в) – № 3 (2000–2016 гг.), (г) – № 4 (2003–2016 гг.), (д) – № 5 (2003–2016 гг.), (е) – № 6 (2003–2016 гг.).

размыва на этом участке за 2000–2016 гг. превышала 80 м. Овраг имеет одну вершину, ширина его при вершине 9.2 м, глубина вершинного уступа – 2.1 м.

Приводораздельный овраг № 4 расположен в 1250 м на СВ от центра с. Кулюшево Каракулинского района. Овраг первоначально возник на крутом левом склоне долины р. Кобылка (правый приток Камы), в последние годы вершина размывает плотный глинистый элювий коренных пород в средней части склона приводораздельной поверхности. Овраг растет тремя вершинами (рис. 2г). Глубина вершинного уступа в 2017 г. составляла 1.3 м, ширина оврага при вершине, соответственно, 7.5 м.

Овраг № 5 на ключевом участке “Кулюшево-2” расположен в 2.6 км к ЮЗ от одноименного населенного пункта. По типу овраг является приводораздельным, по происхождению техногенным, возник в результате залповых выпусков вод с площадок добычи нефти через водопропускную трубу, проложенную через дорожную насыпь. Техногенный овраг имеет одну округлую вершину, которая начала обособляться на две отдельные и намечается еще третья (рис. 2д). Глубина вершинного уступа в 2017 г. уменьшилась до 0.9 м, ширина оврага при вершине, соответственно, увеличилась до 12 м.

Вершинный овраг № 6 размывает днище в верхней части голоценовой балки и находится в 2 км на Ю–ЮЗ от южной окраины с. Варзи-Ятчи Алнашского района. Овраг отличается большой площадью водосбора (табл. 1) и на протяжении длительного времени имел 2 вершины, а с 2008 г. появилась третья, которая достаточно активно развивается в последние годы (рис. 2е). Ширина оврага при вершине в 2017 г. составила 12 м, а глубина вершинного уступа – 1.5 м.

Водосборные площади всех наблюдаемых оврагов представлены обрабатываемыми пахотными угодьями, при этом вершины первичных оврагов практически вплотную подходят к пашне. Балочные водосборы вторичных оврагов (донные и вершинные) также обрабатываются, там выращиваются зерновые (озимая рожь и овес) и зернобобовые культуры с чередованием кормовых и технических культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для более детального изучения динамики развития оврагов используются геодезическая съемка с применением электронного тахеометра [19, 20] и съемка с помощью наземного лазерного 3D-сканера [21]. Наземное лазерное 3D-сканирование позволяет достигать точности до долей миллиметра [22] и создавать трехмерную модель изучаемого объекта. Но при этом стоит учитывать доро-

говизну соответствующего оборудования и поэтому отсутствие пока их массового применения.

Выбор отдельного метода или набора методов для оценки темпов роста оврагов зависит от периода времени, для которого проводятся исследования динамики овражной сети и требуемой точности конечных оценок. Выделяются короткий (1–10 лет) [23, 24] и длинный (более 10 лет) временные интервалы [25, 26]. Иногда внутри короткого интервала также выделяют средний временной интервал (5–10 лет) [24]. Для короткого временного интервала чаще применяют следующий набор методов: измерение линейного прироста вершины оврага методом реперов [19] и с помощью беспилотных летательных систем [27], объемные измерения с использованием наземного лазерного сканирования [28, 29], фотограмметрии и повторных DGPS измерений (для создания цифровой модели рельефа) [27, 30, 31]. Более точные методы используются в тех случаях, когда исследуются механизмы процессов или существует необходимость максимально повысить точность оценок площадного или объемного прироста.

Топографо-геодезические работы, проводимые при изучении регрессивного роста оврагов, включают в высокоточной тахеометрической съемке вершин, размываемых уступов, их бровок, а также тальвегов исследуемых оврагов. На основе повторной тахеометрической съемки оцениваются линейный прирост и изменения плановой конфигурации бровок и тальвегов.

Тахеометрическая съемка велась нами вначале с помощью отечественных оптических теодолитов Т30 и 2Т30, а с 2001 г. начали применяться лазерные электронные тахеометры “Trimble 3305”, затем “Nicon NPR-332”.

В пределах исследуемой территории было выбрано 3 метеорологические станции (г. Ижевск, г. Можга и г. Сарапул), ближе всего расположенные к участкам мониторинга, и 3 гидрологических поста: р. Позимь (г. Ижевск), р. Вала (с. Вавож) и р. Адамка (с. Грахово) (рис. 1). Здесь были собраны следующие данные наблюдений: годовая сумма осадков, сумма осадков теплого периода, сумма осадков летних месяцев, максимальный суточный слой осадков в летние месяцы, сумма максимальных суточных осадков за летние месяцы, максимальные запасы воды в снеге, глубина промерзания почвы, продолжительность снеготаяния, максимальный расход воды в период весеннего половодья и годовая норма стока воды. На основе этих данных дополнительно были рассчитаны: интенсивность снеготаяния, как производная от деления максимальных запасов воды в снеге на продолжительность снеготаяния, и интенсивность половодного стока, полученная по соотношению между максимальным расходом воды в период половодья и годовой нормой стока.

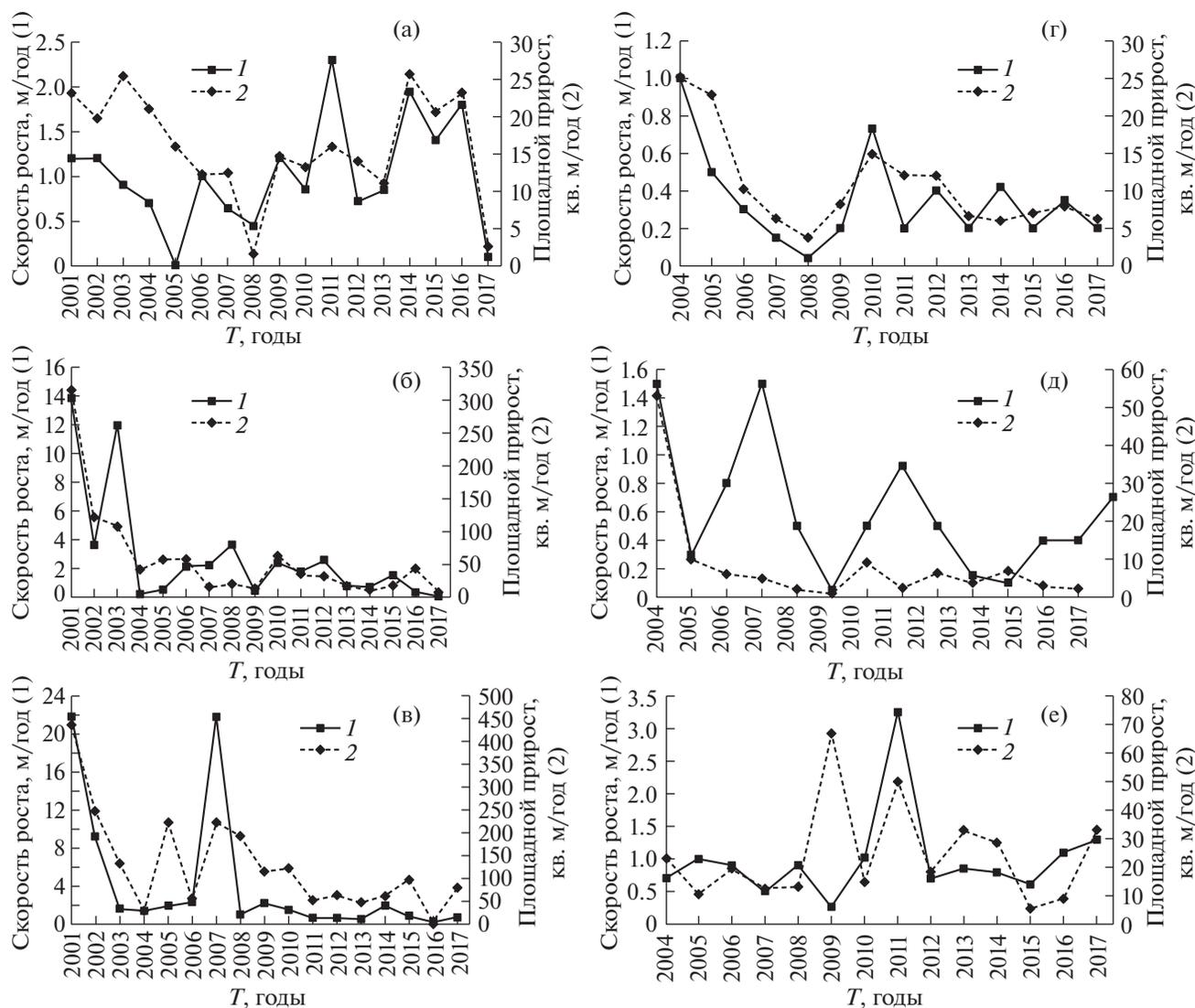


Рис. 3. Графики изменения линейного (1) и площадного (2) прироста вершинной части оврагов: (а) – № 1 (2001–2017 гг.), (б) – № 2 (2001–2017 гг.), (в) – № 3 (2001–2017 гг.), (г) – № 4 (2004–2017 гг.), (д) – № 5 (2004–2017 гг.), (е) – № 6 (2004–2017 гг.).

Для всех рассматриваемых 6 оврагов вначале рассчитаны корреляционные связи между ежегодными линейными и площадными величинами их прироста на каждом из ключевых участках. На втором этапе были установлены корреляционные связи между величинами прироста оврагов и гидрометеорологическими факторами.

Поскольку не всегда рассматриваемые зависимости являются прямолинейными, то, наряду с обычным коэффициентом корреляции (r), были вычислены и дополнительные показатели – корреляционное отношение (η) и квадрат корреляционного отношения (η^2). Проверка гипотезы о форме связи между анализируемыми переменными осуществлялась с помощью критериев Блэкмана и Фишера [32].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Анализ данных линейного и площадного приростов оврага № 1 за 2000–2017 гг. показал наличие не высокой, но надежной связи между ними ($r = 0.569$; $\eta = 0.650$; $\eta^2 = 0.422$). В целом отмечается более плавное изменение площадного прироста, в отличие от линейного, для последнего характерна более резкая амплитуда изменения величин по годам. Асинхронными изменения рассматриваемых показателей были лишь в 2003 и 2006 г. (рис. 3а).

Линейный и площадной приросты вершинной части донного оврага № 2 за рассматриваемый период имеют общую тенденцию к затуханию (рис. 3б). Максимальный прирост отступления его вершины был отмечен в 2001 г. и составил 13.8 м.

Площадной прирост вершинной части оврага в этот год также был наибольшим — 315.4 м², что хорошо видно и на схеме (рис. 2б). В последующие же годы наблюдений линейный и площадной приросты оврага не всегда коррелировали между собой по величине. Заметим здесь, что экстремальный прирост оврага мог быть частично связан с геоморфологическими особенностями поверхности, где он развивается. Так, в днище исследованного нами водосбора балки в 2001 и 2003 г. темпы прироста вершины донного оврага были аномально высокими (в 3–6 раз выше, чем в предшествующие и последующие годы,) что в немалой степени могло быть связано с размывом и последующим обрушением тоннелей, возникших благодаря развитию процессов суффозии в днище долины балки непосредственно выше по течению от его вершины. Аналогичный процесс оврагообразования был описан и на Боровском полигоне МГУ при стационарных наблюдениях с 1985 по 1999 г. [33]. Судя по конфигурации контура площадного прироста этого оврага, такой сценарий вполне мог иметь место весной 2003 г. при значительном талом стоке. Такое же несоответствие между линейным и площадным приростом вершинной части оврага наблюдалось в 2004 г., когда был отмечен минимальный линейный прирост (0.2 м), а площадной прирост был существенным (41.8 м²), по всей видимости, за счет размыва или обрушения нависающих карнизов бровок на его склонах (рис. 3б). Несмотря на это, корреляционный анализ показал, что связь между линейным и площадным приростом вершинной части оврага оказалась достаточно высокой ($r = 0.838$, $\eta = 0.319$, $\eta^2 = 0.102$), что обычно характерно для одновершинных оврагов.

График изменения линейного и площадного приростов оврага № 3 показывает, что за рассматриваемый период синхронность этих показателей не всегда проявляется. Максимальные показатели, как и в предыдущем случае, отмечены в 2001 г., когда вершина оврага отступила на 21.8 м, а площадь размыва составила 436.7 м² (рис. 3в). Высокий показатель линейного прироста оврага был отмечен также в 2007 г., хотя площадной прирост был в 2 раза меньше максимального. Существенное сокращение линейного прироста оврага наблюдается с 2011 г., что связано с сооружением при вершине оврага противоэрозионного земляного вала с водопропускной трубой диаметром около 700 мм. Рост вершины в основном происходил за счет обрушения крутых вершинных уступов или нависающих карнизов, а прирост площади был связан с размывом и обрушением крутых склонов оврага, частично вызванных и боковым размывом реки в период половодья. Зависимость между рассматриваемыми показателями также оказалась высокой ($r = 0.790$, $\eta = 0.432$, $\eta^2 = 0.187$),

что характерно, как и в предыдущем случае, для одновершинных оврагов, независимо от их типа и особенностей их водосборов.

Связь между линейным и площадным приростами вершинной части оврага № 4 оказывается также весьма тесной ($r = 0.832$; $\eta = 0.455$; $\eta^2 = 0.207$), несмотря на рост его тремя вершинами. Асинхронность показателей отчетливо прослеживается только в 2014 и в меньшей степени в 2015 г. (рис. 3г). В последние годы более интенсивно растут вторая и третья вершины, расположенные южнее главной (ниже по склону). Причина асинхронности линейного и площадного приростов в отдельные годы объясняется здесь тем, что главная вершина начала размывать более прочные коренные породы и линейный прирост резко уменьшился, а основной сток с водосбора был направлен по новой полевой дороге, которая была смещена в сторону от главной вершины. В результате этого более интенсивно начался размыв второй и особенно третьей вершины, куда направлялся весь сток, при этом они развиваются в легко размываемых делювиально-солифлюкционных суглинках, обеспечивая и площадной прирост.

Анализ графика изменения линейного и площадного прироста оврага № 5 за период 2004–2017 гг. показывает часто противоположно направленные величины. Рассчитанный коэффициент корреляции показал наличие лишь умеренной связи между линейным и площадным приростом оврага ($r = 0.567$, $\eta = 0.442$; $\eta^2 = 0.195$), что обычно характерно для многовершинных оврагов. Поскольку овраг техногенный, и его линейный и площадной приросты тесно привязаны к водопропускному сооружению и не зависят от его морфолого-морфометрических и литологических особенностей. Максимальные приросты линейного и площадного размыва зарегистрированы в 2004 г. В последующие годы овраг рос скачкообразно преимущественно в длину, размывы бровок склонов были незначительными (рис. 3д). Здесь скачкообразный линейный прирост вершин можно объяснить залповыми сбросами отработанных вод с площадок нефтедобычи, а поводный или ливневый сток обеспечивал незначительный площадной прирост.

На графике связь между линейным и площадным приростом вершинной части оврага № 6 проявляется недостаточно четко (рис. 3е). Здесь, в отличие от предыдущих оврагов, максимальный линейный прирост был зарегистрирован в 2011 г., а наибольший прирост площади был в 2009 г. Как показывает график, вершинный овраг активизировался в 2015–2017 гг., что подтверждается наблюдениям 2018 г., когда его линейный прирост составил 1.6 м. Тенденция активизации развития вторичных (донных и вершинных) оврагов обна-

руживается и на других ключевых участках. Более значительные темпы прироста донных и вершинных оврагов позволяют предположить, что, несмотря на резкое сокращение или почти полное исчезновение поверхностного стока со склонов, вследствие увеличения теплых зимних периодов, в днищах сухих долин, где формируются донные врезы, в период снеготаяния происходит выклинивание внутрпочвенного стока. Именно он в основном формирует временные водотоки, способствующие постепенному регрессивному отступанию вершин донных оврагов [34]. Исследования 90 овражных систем в Португалии также показали, что они выросли в основном за счет массовых размывов в привершинных и боковых стенках, под влиянием подповерхностных вод [35].

Статистический анализ между линейным и площадным приростом оврага за рассматриваемый период показал отсутствие достоверной положительной связи между ними ($r = 0.269$, $\eta = 0.300$; $\eta^2 = 0.090$), что хорошо видно и на графике (рис. 3е). Во всех вышеперечисленных случаях расчеты критериев Блекмана и Фишера показали отсутствие значимых криволинейных связей между анализируемыми показателями. Отсутствие связи для многовершинного оврага в данном случае можно объяснить только перераспределением стока по ширине днища балки, что может быть вызвано формированием новых ложбин стока, возникающих при обработке пахотных земель на значительном по площади водосборе, что подтверждают и полевые наблюдения.

В пределах исследуемой территории склоновый сток формируется в период весеннего снеготаяния и при выпадении интенсивных ливней в теплое время года. Известно сравнительно немного исследований, в которых проведено непосредственное сопоставление вклада талого и ливневого стока в линейный рост вершин оврагов. Результаты мониторинга прироста оврагов в Европейской части России, проводившиеся преимущественно в 1970–1980-е годы в Среднем Поволжье, включая Удмуртскую Республику, а также в Калужской области, указывают на то, что около 80% прироста приходится на период снеготаяния, тогда так вклад ливневого стока составляет 20% [1, 2, 36]. По данным сезонного и годовых темпов прироста оврагов Юго-Западного Прибайкалья с 1985 по 1995 г. установлено, что 70% годового прироста приходится на летний период, 30% – на период снеготаяния [37]. В Забайкалье более 80% годового увеличения длины оврагов отмечалось в летне-осенний период [38, 39]. Данные инструментальных наблюдений за линейным и площадным приростом 2 оврагов в Баргузинской котловине с 1985 по 2009 г. также показали их асинхронность, при этом в годы отсутствия линейного прироста обнаруживался существенный

площадной прирост [37]. Результаты 16-летнего мониторинга (1981–1996 гг.) линейного прироста вершин оврагов на Молдавском плато в восточной Румынии позволили оценить вклад талого и ливневого стока в 57 и 43% соответственно [40]. При этом более 66% суммарного прироста вершин приходится на четыре года, которые характеризовались выпадением сильных ливней и/или значительным стоком в период снеготаяния. При этом средний прирост вершины оврага за период 1961–1990 гг. составил 12.5 м/год, что сопровождалось средним ростом площади оврага на 366.8 м²/год. Активизация овражной эрозии после 1960-х годов, наряду с гидрометеорологическими факторами, также связана с крупными изменениями в землепользовании [40, 41]. Непосредственные измерения стока воды и наносов и линейного роста донных оврагов на Люблинской возвышенности в Польше в период 2003–2005 гг. выявили доминирование (86%) талого стока, как основной причины отступания вершин. Однако анализ гидрометеорологических данных и предшествующих наблюдений показал, что на самом деле вклад в линейный прирост оврагов аномально интенсивных ливней значительно выше, чем талого стока [42]. О высокой роли гидрометеорологических факторов (величины стока с овражного водосбора и интенсивности осадков) подтверждают и исследования прироста вершин 933 оврагов в 70 регионах мира [43].

При оценке влияния гидрометеорологических параметров на темпы линейного роста агрогенных оврагов необходимо учитывать пространственно-временные изменения этих факторов и принимать во внимание, что помимо них существует целый ряд морфологических характеристик водосборов оврагов и собственно вершин оврагов, которые сказываются на индивидуальных особенностях развития овражных форм [44, 45].

Анализ гидрометеорологических показателей за 1998–2016 гг. и линейного прироста рассматриваемых в нашей работе оврагов не выявил тесной связи ни с одним из анализируемых факторов. Умеренная положительная связь обнаружена лишь у вершинного оврага № 6 с интенсивностью половодного стока на р. Адамка ($r = 0.562$, $\eta = 0.770$, $\eta^2 = 0.592$) и у донного оврага № 2 с интенсивностью снеготаяния ($r = 0.462$, $\eta = 0.342$, $\eta^2 = 0.117$). Анализ площадного прироста за 2000–2016 гг. выявил существенную связь у оврага № 3 с интенсивностью снеготаяния ($r = 0.607$) и умеренную положительную связь с интенсивностью половодного стока на р. Адамка ($r = 0.523$). Тесная связь с годовой суммой осадков ($r = 0.604$) и умеренная с интенсивностью половодного стока на р. Адамка ($r = 0.575$) обнаружена для донного оврага № 2 (табл. 2). Это говорит о том, что талый

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (r), коэффициенты детерминации (η^2) и корреляционные отношения (η) площадного прироста оврагов и гидрометеорологических показателей за 2000–2016 гг.

Гидрометеорологические показатели и коэффициенты связи		Номера исследуемых оврагов					
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Qm/Qn	r	0.023	0.575	0.523	-0.358	-0.169	0.089
	η^2	0.096	0.506	0.564	0.300	0.398	0.634
	η	0.310	0.711	0.751	0.548	0.631	0.796
T	r	0.323	-0.239	-0.390	0.384	0.028	0.043
	η^2	0.177	0.100	0.264	0.961	0.412	0.135
	η	0.421	0.316	0.514	0.980	0.642	0.367
He	r	-0.011	0.358	0.311	0.158	0.236	-0.005
	η^2	0.171	0.348	0.586	0.195	0.061	0.276
	η	0.414	0.590	0.766	0.441	0.248	0.526
He/T	r	-0.090	0.445	0.607	-0.246	0.241	0.165
	η^2	0.428	0.074	0.174	0.345	0.157	0.353
	η	0.654	0.272	0.417	0.588	0.396	0.594
Mn	r	-0.359	0.184	0.115	-0.314	0.002	0.304
	η^2	0.446	0.646	0.412	0.122	0.043	0.187
	η	0.667	0.804	0.642	0.350	0.208	0.433
R	r	0.350	0.604	0.428	0.199	-0.069	-0.318
	η^2	0.317	0.083	0.057	0.159	0.046	0.672
	η	0.563	0.288	0.239	0.398	0.216	0.820
Rw	r	0.312	0.429	0.231	0.250	0.010	-0.207
	η^2	0.430	0.079	0.102	0.053	0.134	0.332
	η	0.656	0.281	0.320	0.230	0.366	0.576
Rs	r	0.104	0.190	0.244	0.121	-0.041	-0.130
	η^2	0.227	0.064	0.124	0.420	0.183	0.434
	η	0.477	0.252	0.352	0.648	0.428	0.659
Rd	r	-0.095	0.278	0.406	0.005	0.044	0.238
	η^2	0.167	0.305	0.301	0.223	0.059	0.535
	η	0.408	0.552	0.549	0.472	0.242	0.732
Rs_{max}	r	0.019	0.330	0.311	0.093	-0.070	-0.081
	η^2	0.087	0.373	0.130	0.171	0.373	0.305
	η	0.294	0.610	0.361	0.413	0.611	0.552
Rw_{max}	r	0.014	0.377	0.066	0.040	-0.184	-0.204
	η^2	0.276	0.266	0.095	0.260	0.412	0.125
	η	0.526	0.516	0.308	0.510	0.642	0.354

Примечание. Qm/Qn – интенсивность половодного стока, T – продолжительность снеготаяния, He – максимальные запасы воды в снеге, He/T – интенсивность снеготаяния, Mn – максимальная глубина промерзания почвы, R – годовая сумма осадков, Rw – сумма осадков теплого периода (апрель – октябрь), Rs – сумма осадков летних месяцев, Rd – максимальное суточное количество осадков по летним месяцам, Rs_{max} – сумма максимальных суточных осадков по летним месяцам, Rw_{max} – сумма максимальных суточных осадков теплого периода (апрель – октябрь). Жирным шрифтом выделены наиболее значимые коэффициенты связи.

сток перестал играть доминирующую роль в линейном росте оврагов за анализируемый период.

Учитывая, что в рассматриваемый период происходили как климатические изменения, связан-

ные с потеплением климата, особенно повышение температуры воздуха в зимние месяцы, так и сокращения площади пашни, максимум которого пришелся на период 1990–2003 гг., можно утвер-

ждать, что именно данные факторы сказались на общем уменьшении темпов прироста оврагов в последние годы.

В перспективе необходим дальнейший детальный анализ гидрометеорологических параметров и изменений условий землепользования на водосборах оврагов, включенных в общую сеть мониторинга, для количественной оценки вклада каждого из этих факторов, а также их составляющих, в динамику прироста оврагов различного типа. Поэтому мониторинг овражной эрозии следует продолжить, к тому же по длительности наблюдения и охвату территории он не имеет аналогов ни в нашей стране, ни за рубежом [43].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование линейных измерений на протяжении достаточно длительного периода оставалось основным и наиболее точным способом оценки роста оврагов. При этом способе можно получить относительно точные данные о линейном приросте вершины оврага, но даже при использовании нескольких реперов он не позволяет с достаточной точностью оценить площадной и объемный прирост вершин оврагов. Топографо-геодезические работы, проводимые при изучении регрессивного роста оврагов, заключаются в высокоточной тахеометрической съемке вершин, размываемых уступов, их бровок, а также тальвегов исследуемых оврагов. На основе повторной тахеометрической съемки оцениваются линейный прирост и изменения плановой конфигурации бровок и тальвегов. Начиная с 2000-х годов на ряде активно растущих оврагов проводятся ежегодные измерения линейного и площадного прироста вершин. Для большинства рассматриваемых оврагов максимальные размывы наблюдались в 2001 г., когда линейные приросты варьировали в пределах 2,3–21,8 м, а площадные, соответственно, – от 23,1 до 436,7 м².

Анализ результатов многолетнего изучения линейного и площадного прироста вершинной части различных типов оврагов показал, что в большинстве случаев проявляется отчетливая зависимость между рассматриваемыми показателями, что наиболее характерно для донного одновершинного оврага (“Курегово”) и приводораздельного (“Кулюшево-1”), растущего тремя вершинами ($r = 0.832$). Достаточно высокая связь обнаружена и у придолинного оврага на правом склоне долины р. Вятка (“Крымская Слудка”) ($r = 0.790$), несмотря на обвалование его вершины. Умеренная связь оказалась у приводораздельного одновершинного оврага на ключевом участке “Вятское” ($r = 0.569$) и приводораздельного трехвершинного оврага на ключевом участке “Кулюшево-2” ($r = 0.567$), имеющего техногенное происхождение. Не обнаружена связь

только у вершинного оврага (“Варзи-Ятчи”), растущего в верховьях днища голоценовой балки тремя вершинами ($r = 0.269$), что объясняется формированием новых ложбин стока, возникающих при обработке пахотных земель на водосборе. Во всех случаях отмечаются плавное изменение по годам площадного прироста и достаточно резкое колебание величин линейного прироста вершин оврагов, независимо от типа и их морфолого-морфометрических особенностей. Асинхронность линейного и площадного прироста исследуемых оврагов не совпадает по годам и не связана с гидрометеорологическими показателями. Зависимость их ежегодного прироста от условий землепользования на водосборе и их морфолого-морфометрических особенностей также не выявлена.

Анализ гидрометеорологических показателей за 1998–2016 гг. и линейного прироста рассматриваемых оврагов не выявил тесной связи ни с одним из анализируемых факторов. Анализ площадного прироста за те же годы выявил существенную связь лишь у двух оврагов с интенсивностью снеготаяния ($r = 0.607$) и годовой суммой осадков ($r = 0.604$) и, соответственно, умеренную связь с интенсивностью половодного стока в створе ближайшей малой реки. Это говорит о том, что талый сток перестал играть доминирующую роль в линейном росте оврагов за рассматриваемый период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рысин И.И. Овражная эрозия в Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 1998. 274 с.
2. География овражной эрозии / Под ред. Е.Ф. Зориной. М.: Изд-во МГУ, 2006. 324 с.
3. Григорьев И.И., Рысин И.И. Исследования техногенных и сельскохозяйственных оврагов в Удмуртии // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2006. Вып. 2. С. 83–91.
4. Григорьев И.И. Пространственно-временной анализ скоростей роста техногенных оврагов на территории Удмуртии // Эрозия почв, овражная эрозия, русловые процессы: теоретические и прикладные вопросы. М.: Изд-во МГУ, 2011. С. 90–99.
5. Рысин И.И., Григорьев И.И., Зайцева М.Ю. Результаты исследований овражной эрозии в Удмуртии за последние два десятилетия // Наука Удмуртии. 2015. № 3. С. 150–164.
6. Болысов С.И., Тарзаева Н.В. Метеорологический фактор в развитии регрессивной эрозии на юго-западе Подмосковья // Геоморфология. 1996. № 4. С. 97–103.
7. Григорьев И.И. Использование программного комплекса “Credo” для определения объемов и площадей оврагов // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2009. Вып. 2. С. 141–145.

8. Рыжов Ю.В. Овражная эрозия в межгорных котловинах Юго-Западного Прибайкалья // Геоморфология. 1998. № 3. С. 68–73.
9. Назаров Н.Н. Овражная эрозия в Прикамье. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 104 с.
10. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 416 с.
11. Дедков А.П., Рысин И.И., Чернышева Т.Н. Овражная эрозия на пахотных землях Европы // Геоморфология. 1993. № 2. С. 3–13.
12. Зорина Е.Ф., Никольская И.И., Ковалев С.Н. Методика определения интенсивности роста оврагов // Геоморфология. 1993. № 3. С. 66–75.
13. Коротина Н.М. Скорость роста оврагов в Ульяновском Поволжье // Геоморфология. 1981. № 4. С. 78–83.
14. Рысин И.И. О современном тренде овражной эрозии в Удмуртии // Геоморфология. 1998. № 3. С. 92–101.
15. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Пространственно-временные изменения основных показателей температурно-влажностного режима в Приволжском федеральном округе // Метеорология и гидрология. 2014. № 10. С. 19–31.
16. Атлас Удмуртской Республики / Под ред. И.И. Рысына. М.: Феория, 2016. 282 с.
17. Акмаров П.Б., Князева О.П., Рысин И.И. Агроклиматический потенциал эффективности земледелия // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2014. Вып. 2. С. 89–96.
18. Гусаров А.В., Рысин И.И., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н. Оценка современного тренда эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распахиваемом водосборе с использованием цезия-137 в качестве хрономаркера (юг Удмуртской Республики) // Геоморфология. 2019. № 2. С. 37–56.
19. Григорьев И.И., Рысин И.И. Техногенные овраги на территории Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 2017. 190 с.
20. Сатдаров А.З. Методы исследования регрессивного роста оврагов: достоинства и недостатки // Уч. зап. Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2016. № 158 (2). С. 277–292.
21. Usmanov B., Yermolaev O., and Gafurov A. Estimates of slope erosion intensity utilizing terrestrial laser scanning // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2015. (367). P. 59–65.
22. Гафуров А.М., Усманов Б.М. Оценка интенсивности и динамики почвенной эрозии методом наземного лазерного сканирования // Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов) / Сб. статей по материалам XI семинара молодых ученых вузов, объединяемых Советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Н. Новгород: Мининский ун-т, 2016. С. 81–90.
23. Frankl A., Stal C., Abraha A., Nyssen J., Rieke-Zapp D., De Wulf A., and Poesen J. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling // Catena. 2015. (127). P. 92–101.
24. Marzolf I., Ries J.B., and Poesen J. Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment // Earth Surface Processes and Landforms. 2011. No. 12 (36). P. 1604–1623.
25. Rishikeshan C.A., Katiyar S.K., and Mahesh V.N.V. Detailed Evaluation of DEM Interpolation Methods in GIS Using DGPS Data // International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. 2014. P. 666–671.
26. Li W., Fu H., Yu L., Gong P., Feng D., Li C., and Clinton N. Stacked Autoencoder-based deep learning for remote-sensing image classification: a case study of African land-cover mapping // International J. Remote Sensing. 2016. No. 23 (37). P. 5632–5646.
27. Гафуров А.М., Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Шарифуллин А.Г. Оценка современного роста вершин оврагов южного мегасклона Восточно-Европейской равнины с применением набора инструментальных методов // Вестн. Моск. ун-та, Сер. 5. География. 2018. № 5. С. 61–71.
28. Kociuba W., Janicki G., Rodzik J., and Stepniewski K. Comparison of volumetric and remote sensing methods (TLS) for assessing the development of a permanent forested loess gully // Natural Hazards. 2015. No. S1 (79). P. 139–158.
29. Caraballo-Arias N.A., Conoscenti C., Di Stefano C., Ferro V., and Gymez-Gutierrez A. Morphometric and hydraulic geometry assessment of a gully in SW Spain // Geomorphology. 2016. No. 274. P. 143–151.
30. Chen Y., Jiao J., Wei Y., Zhao H., Yu W., Cao B., Xu H., Yan F., Wu D., and Li H. Accuracy Assessment of the Planar Morphology of Valley Bank Gullies Extracted with High Resolution Remote Sensing Imagery on the Loess Plateau // Int. J. Environ. Res. Public Health. China. 2019. No. 16. 369 p.
31. Seutloali K.E., Beckedahl H.R., Dube T. and Sibanda M. An assessment of gully erosion along major armoured roads in south-eastern region of South Africa: a remote sensing and GIS approach // Geocarto International. 31: 2. P. 225–239.
32. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.
33. Веретенникова М.В., Зорина Е.Ф., Ковалев С.Н., Любимов Б.П. Стационарные исследования процессов оврагообразования на Боровском учебно-научном полигоне географического факультета МГУ // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2003. Вып. 14. С. 76–92.
34. Рысин И.И., Григорьев И.И., Зайцева М.Ю., Голосов В.Н. Линейный прирост оврагов Вятско-Камского междуречья на рубеже XX и XXI столетий // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 1. С. 63–72.
35. Raffaello B. and Reis E. Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression based exploration using reconstructed pre-erosion topography // Catena. 2016. Vol. 147. P. 621–631.
36. Бутаков Г.П., Зорина Е.Ф., Никольская И.И., Рысин И.И., Серебренникова И.А., Юсупова В.В. Тенденции развития овражной эрозии в Европейской России // Эрозионные и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 3. С. 52–62.
37. Рыжов Ю.В. Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: ГЕО, 2015. 180 с.

38. *Базарова Л.Д.* Эрозионные формы рельефа Чикойской впадины // Геология, палеовулканология и рельеф Забайкалья / Отв. ред. Г.В. Андреев. Улан-Удэ: БФ СО АН СССР, Геол. ин-т, 1986. С. 153–162.
39. *Тармаев В.А.* Интенсивность образования линейной эрозии в бассейне р. Куналейки (Забайкалье) // География и природные ресурсы. 1992. № 1. С. 98–102.
40. *Ionita I.* Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // *Catena*. 2006. Vol. 68. P. 133–140.
41. *Ionita I., Niacsu L., Petrovici G., and Blebea-Apostu A.M.* Gully development in eastern Romania: a case study from Falcu Hills // *Nat Hazards*. 2015. No. 79(1). P. 113–138.
42. *Rodzik J., Furtak T., and Zglobicki W.* The impact of snowmelt and heavy rainfall runoff on erosion rates in a gully system, Lublin Upland, Poland // *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009. Vol. 34. No. 14. P. 1938–1950.
43. *Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Bezerra J.F.R., Bolysov S., Dvinskih A., Frankl A., Fuseina Y., Guerra A.J.T., Haregeweyn N., Ionita I., Makanzu Imwangana F., Moeyersons J., Moshe I., Nazari Samani A., Niacsu L., Nyssen J., Otsuki Y., Radoane M., Rysin I., Ryzhov Yu., and Yermolaev O.* How fast do gully headcuts retreat? // *Earth Science Reviews*. 2016. No. 154. P. 336–355.
44. *Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., and Valentin C.* Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs // *Catena*. 2003. Vol. 50. P. 91–133.
45. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / Под ред. В.Н. Голосова, О.П. Ермолаева. Казань: Изд-во АН РТ, 2019. 372 с.

Estimation of linear and areal growth of gullies using instrumental methods (on the territory of Udmurtia)

I. I. Grigorev^{a,#} and I. I. Rysin^{a,##}

^a Udmurt State University, Izhevsk, Russia

[#] E-mail: ivangrig@yandex.ru,

^{##} E-mail: rysin.iwan@yandex.ru

The main goal of this investigation is to establish the relationships between linear and areal expansion of gullies based on their morphology, dimensions and hydrometeorological conditions. Instrumental methods for studying linear and areal growth of gullies on agricultural land for the period from the early 2000s to 2017 are considered. The instrumental methods of the study included a planned geodetic survey of the top part of the gullies, including the edges, talweg and transverse profiles using an electronic total station. Records from the three nearest meteostations and stream gages were used in the analysis. The objects of the study include 6 gullies of various types (at the watershed, near-valley, top and bottom), developing within 6 key areas, where their catchment areas are arable land used for crops of legumes and forage crops. The main purpose of the research is to identify the relationship between the linear and areal growth of ravines, depending on their morphological and morphometric features and hydrometeorological conditions. For two of the gullies under consideration, the maximum erosion was observed in 2001, when the linear headcuts retreat varied from 2.3–21.8 m, and the areal ones, respectively, from 23.1 to 436.7 m². It is established that in most cases there is a clear relationship between the considered indicators, which is most typical for a bottom single-top gully and at the watershed growing with three headcuts ($r = 0.832$). A fairly high correlation was also found in the near-valley single-top gully on the right slope of the Vyatka river valley ($r = 0.790$), which erodes periglacial alluvium within the locality. The average relationship was observed in the single-top ($r = 0.569$) and technogenic three-top gullies ($r = 0.567$) developing in different key areas of the right bank of the Kama river. No connection was found only in one top gully growing in the upper part of the Holocene gulch bottom with three headcuts ($r = 0.269$), which is explained by the technogenic redistribution of runoff in the plowed catchment of the gully. A smooth change in the area growth over the years and a rather sharp fluctuation in the values of the linear growth of the headcuts of gullies, regardless of the type and their morphological and morphometric features, were revealed. The dependence of their annual growth on the conditions of land use in the catchment area and their morphological and morphometric features has not been revealed. The analysis of hydro-meteorological indicators for 1998–2016 and the linear growth of the considered gullies did not reveal a close relationship with any of the analyzed factors. A significant relationship between the area growth in 2000–2016 was found only in two gullies with the intensity of snowmelt and the annual amount of precipitation, and, accordingly, a moderate relationship with the intensity of flood runoff in the line of the nearest small river. The research has shown that the spring flood runoff has ceased to play a dominant role in the linear and areal growth of gullies during the period under review.

Keywords: growth of gullies, instrumental survey, monitoring, correlation analysis, hydrometeorological factors

REFERENCE

1. Rysin I.I. *Ovrazhnaya eroziya v Udmurtii* (Gully erosion in Udmurtia). Izhevsk: UdsU (Publ.), 1998. 274 p (in Russ.)
2. *Geografiya ovrazhnoi erozii* (Geography of gully erosion). E.F. Zorina (Ed.). Moscow: MSU (Publ.), 2006. 324 p. (in Russ.)
3. Grigorev I.I. and Rysin I.I. *Issledovaniya tekhnogennykh i sel'skokhozyaistvennykh ovragov v Udmurtii* (Research of technogenic and agricultural ravines in Udmurtia). *Vestnik Udm. Un-ta. Ser. Biol. Nauki o Zemle*. 2006. No. 2. P. 83–91. (in Russ.)
4. Grigorev I.I. *Prostranstvenno-vremennoi analiz skorosti rosta tekhnogennykh ovragov na territorii Udmurtii* (Spatiotemporal analysis of growth rates of technogenic ravines on the territory of Udmurtia). *Eroziya pochv, ovrazhnaya eroziya, ruslovyie protsessy: teoreticheskie i prikladnye voprosy* (Soil erosion, gully erosion, channel processes: theoretical and applied issues). Moscow: MSU (Publ.), 2011. P. 90–99. (in Russ.)
5. Rysin I.I., Grigorev I.I., and Zaitseva M.Yu. *Rezultaty issledovaniya ovrazhnoi erozii v Udmurtii za poslednie dva desyatiletia* (Results of research of gully erosion in Udmurtia for the last two decades). *Nauka Udmurtiya*. No. 3 (73). 2015. P. 150–164. (in Russ.)
6. Bolysov S.I. and Tarzaeva N.V. *Meteorologicheskii faktor v razvitiie regressivnoi erozii na yugo-zapade Moskvy* (Meteorological factor in the development of regressive erosion in the South-West of the Moscow region). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1996. No. 4. P. 97–103. (in Russ.)
7. Grigorev I.I. *Ispol'zovanie programmnogo kompleksa "Credo" dlya opredeleniya o'emov i ploshchadei ovragov* (Using the software complex "Credo" to determine the volume and area of ravines). *Vestnik Udm. Un-ta. Ser. Biol. Nauki o Zemle*. 2009. No. 2. P. 141–145. (in Russ.)
8. Ryzhov Yu.V. *Ovrazhnaya eroziya v mezhgornnykh kotlovinakh Yugo-Zapadnogo Pribaikal'ya* (Gully erosion in the intermountain basins of the Southwestern Baikal Region). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1998. No. 3. P. 68–73. (in Russ.)
9. Nazarov N.N. *Ovrazhnaya eroziya v Prikam'e* (Gully erosion in Prikam'e). Perm: Izd-vo Perm. un-ta (Publ.), 1992. 104 p. (in Russ.)
10. Rychagov G.I. *Obshchaya geomorfologiya* (General geomorphology). Moscow: MSU (Publ.), 2006. 416 p. (in Russ.)
11. Dedkov A.P., Rysin I.I., Chernysheva T.N. *Ovrazhnaya erozia na pakhotnykh zemlyakh Evropy* (Gully erosion on arable lands of Europe). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1993. No. 2. P. 3–13. (in Russ.)
12. Zorina E.F., Nikol'skaya I.I., and Kovalev S.N. *Metodika opredeleniya intensivnosti rosta ovragov* (Method for determining the intensity of growth of ravines). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1993. No. 3. P. 66–75. (in Russ.)
13. Korotina N.M. *Skorost' rosta ovragov v Ul'yanovskom Povolzh'e* (The growth rate of ravines in the Ulyanovsk Volga region). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1981. No. 4. P. 78–83. (in Russ.)
14. Rysin I.I. *O sovremennom trende ovrazhnoi erozii v Udmurtii* (About the current trend of gully erosion in Udmurtia). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1998. No 3. P. 92–101. (in Russ.)
15. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., and Vazhnova N.A. *Prostranstvenno-vremennnye izmeneniya osnovnykh pokazatelei temperaturno-vlazhnostnogo rezhima v Privolzhskom federal'nom okruge* (Spatial and temporal changes in the main indicators of the temperature and humidity regime in the Volga Federal District). *Meteorologiya i gidrologiya*. 2014. No. 10. P. 19–31. (in Russ.)
16. *Atlas Udmurtskoi Respubliki* (Atlas of the Udmurt Republic). I.I. Rysin (Ed.). M.: Izd-vo Feoriya (Publ.), 2016. 282 p. (in Russ.)
17. Akmarov P.B., Knyazeva O.P., and Rysin I.I. *Agroklimaticheskii potentsial effektivnosti zemledeliya* (Agroclimatic potential of agricultural efficiency). *Vestnik Udmurtskogo un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*. 2014. No. 2. P. 89–96. (in Russ.)
18. Gusarov A.V., Rysin I.I., Sharifullin A.G., and Golosov V.N. *Otzenka sovremennogo trenda erozionno-akkumulativnykh protsessov v malom raspakhivaemom vodobore s ispol'zovaniem tseziya-137 v kachestve khromarkera (yug Udmurtskoi Respubliki)* (Assessment of the current trend of erosion-accumulative processes in a small plowed watershed using caesium-137 as a chronomarker (South of the Udmurt Republic)). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 2. P. 37–56. (in Russ.)
19. Grigorev I.I. and Rysin I.I. *Tekhnogennye ovragi na territorii Udmurtii* (Technogenic ravines on the territory of Udmurtia). Kazan: Izd-vo Udmurt. Un-ta (Publ.), 2017. 190 p. (in Russ.)
20. Satdarov A.Z. *Metody issledovaniya regressivnogo rosta ovragov: dostoinstva i nedostatki* (Methods of research of regressive growth of ravines: advantages and disadvantages). *Uch. Zapiski Kazan. Un-ta. Ser. Estestv. nauki*. 2016. No. 158 (2). P. 277–292. (in Russ.)
21. Usmanov B., Yermolaev O., and Gafurov A. Estimates of slope erosion intensity utilizing terrestrial laser scanning. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2015. (367). P. 59–65.
22. Gafurov A.M. and Usmanov B.M. *Otsenka intensivnosti i dinamiki pochvennoi erozii metodom nazemnogo lazernogo skanirovaniya* (Evaluation of intensity and dynamics of soil erosion by method of terrestrial laser scanning). *Eroziionnye, rusloviye i ust'evye protsessy* (Erosional, deltaic and channel processes). Moscow: MSU (Publ.), 2016. P. 81–90. (in Russ.)
23. Frankl A., Stal C., Abraha A., Nyssen J., Rieke-Zapp D., De Wulf A., and Poesen J. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling. *Catena*. 2015. (127). P. 92–101.
24. Marzolf I., Ries J.B., and Poesen J. Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2011. No. 12 (36). P. 1604–1623.
25. Rishikeshan C.A., Katiyar S.K., and Mahesh V.N.V. Detailed Evaluation of DEM Interpolation Methods in GIS Using DGPS Data. *International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*. 2014. P. 666–671.

26. Li W., Fu H., Yu L., Gong P., Feng D., Li C., and Clinton N. Stacked Autoencoder-based deep learning for remote-sensing image classification: a case study of African land-cover mapping. *International J. Remote Sensing*. 2016. No. 23 (37). P. 5632–5646.
27. Gafurov A.M., Rysin I.I., Golosov V.N., Grigorev I.I., Sharifullin A.G. *Otzenka sovremennogo rosta vershin ovragev yuzhnogo megasklona Vostochno-Evropeyskoi ravniny s primeneniem nabora instrumentalnykh metodov* (Evaluation of the modern growth of the ravine tops of the southern megasclone of the East European plain using a set of instrumental methods). *Vest. Mosk. Un-ta*. 2018. No. 5. P. 61–71. (in Russ.)
28. Kociuba W., Janicki G., Rodzik J., and Stępniewski K. Comparison of volumetric and remote sensing methods (TLS) for assessing the development of a permanent forested loess gully. *Natural Hazards*. 2015. No. S1 (79). P. 139–158.
29. Caraballo-Arias N.A., Conoscenti C., Di Stefano C., Ferro V., and Gymez-Gutierrez A. Morphometric and hydraulic geometry assessment of a gully in SW Spain. *Geomorphology*. 2016. No. 274. P. 143–151.
30. Chen Y., Jiao J., Wei Y., Zhao H., Yu W., Cao B., Xu H., Yan F., Wu D., and Li H. Accuracy Assessment of the Planar Morphology of Valley Bank Gullies Extracted with High Resolution Remote Sensing Imagery on the Loess Plateau. *Int. J. Environ. Res. Public Health. China*. 2019. No. 16. 369 p.
31. Seutloali K.E., Beckedahl H.R., Dube T., and Sibanda M. An assessment of gully erosion along major armoured roads in south-eastern region of South Africa: a remote sensing and GIS approach. *Geocarto International*. 2016. 31:2. P. 225–239.
32. Lakin G.F. *Biometriya* (Biometrics). Moscow: Vysshaya shkola (Publ.), 1990. 352 p. (in Russ.)
33. Veretennikova M.V., Zorina E.F., Kovalev S.N., and Lyubimov B.P. *Statsionarnye issledovaniya protsessov ovrageobrazovaniya na Borovskom uchebno-nauchnom poligone geograficheskogo fakul'teta MGU* (Stationary studies of the processes of ravine formation at the Borovsky educational and scientific training ground of the Faculty of Geography of Moscow State University) *Eroziya pochv i ruslovy protsessy* (Soil erosion and channel processes). R.S. Chalov (Ed.). Moscow: MSU (Publ.), 2003. No. 14. P. 76–92. (in Russ.)
34. Rysin I.I., Grigorev I.I., Zaitseva M.Yu., and Golosov V.N. *Lineinyi prirost ovragev Vyatsko-Kamskogo mezhdurech'ya na rubezhe XX i XXI stoletii* (Dynamics of the linear retreat of gully heads within the Vyatka-Kama interfluvium at the turn of 20th century). *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2017. No. 1. P. 63–72. (in Russ.)
35. Raffaello B. and Reis E. Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression based exploration using reconstructed pre-erosion topography. *Catena*. 2016. Vol. 147. P. 621–631.
36. Butakov G.P., Zorina E.F., Nikol'skaya I.I., Rysin I.I., Serebrennikova I.A., and Yusupova V.V. *Tendentsii razvitiya ovrazhnoi erozii v Evropeiskoi Rossii* (Trends in the development of gully erosion in European Russia). *Eroziionnye i ruslovy protsessy* (Erosional and channel processes). M.: Izd-vo MGU (Publ.), 2000. No. 3. P. 52–62. (in Russ.)
37. Ryzhov Yu.V. *Formirovanie ovragev na yuge Vostochnoi Sibiri* (Formation of ravines in the south of Eastern Siberia). Novosibirsk: GEO (Publ.), 2015. 180 p. (in Russ.)
38. Bazarova L.D. *Eroziionnye formy rel'efa Chikoiskoi vpadiny* (Erosive landforms of the Chikoy Depression). *Geologiya, paleovulkanologiya i rel'ef Zabaikalya* (Geology, paleovolcanology and relief of Transbaikalia). *Ulan-Ude*, 1986. P. 153–162 (in Russ.)
39. Tarmaev V.A. *Intensivnost' obrazovaniya lineinoi erozii v basseine r. Kunaleiki (Zabaikal'e)* (The intensity of the formation of linear erosion in the basin. Kounalaki (Transbaikalia)). *Geografiya i prirodnye resursy*. 1992. No. 1. P. 98–102. (in Russ.)
40. Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *Catena*. 2006. Vol. 68. P. 133–140.
41. Ionita I., Niacsu L., Petrovici G., and Blebea-Apostu A.M. Gully development in eastern Romania: a case study from Falciu Hills. *Nat Hazards*. 2015. No. 79 (1). P. 113–138.
42. Rodzik J., Furtak T., and Zglobicki W. The impact of snowmelt and heavy rainfall runoff on erosion rates in a gully system, Lublin Upland, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2009. Vol. 34. No. 14. P. 1938–1950.
43. Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Bezerra J.F.R., Bolysov S., Dvinskikh A., Frankl A., Fuseina Yu., Guerra A.J.T., Haregeweyn N., Ionita I., Makanzu Imwangana F., Moeyersons J., Moshe I., Nazari Samani A., Niacsu L., Nyssen J., Otsuki Y., Radoane M., Rysin I., Ryzhov Yu., and Yermolaev O. How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*. 2016. No. 154. P. 336–355.
44. Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., and Valentin C. Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs. *Catena*. 2003. Vol. 50. P. 91–133.
45. *Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitiya sovremennykh protsessov prirodno-antropogennoi erozii na Russkoi ravnine* (Spatio-temporal patterns of development of modern processes of natural and anthropogenic erosion on the Russian plain). V.N. Golosov, O.P. Ermolaev (Eds.). Kazan: Izd-vo AN RT (Publ.), 2019. 372 p. (in Russ.)