

УДК 551.435.1(470.51)

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЛИНЕЙНОГО, ПЛОЩАДНОГО И ОБЪЕМНОГО ПРИРОСТА ОВРАГОВ НА ТЕРРИТОРИИ УДМУРТИИ

© 2022 г. И. И. Григорьев^{1,*}, И. И. Рысин^{1,**}¹Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*E-mail: ivangrig@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

После доработки 22.05.2022 г.

Принята к публикации 15.07.2022 г.

Рассматриваются инструментальные методы изучения линейного, площадного и объемного роста оврагов на сельскохозяйственных землях за период с начала 2000-х до 2021 гг. Методы исследования включали плановую геодезическую съемку вершинной части оврагов, включая бровки, тальвег и поперечные профили с применением электронного тахеометра. Объекты исследования включают 6 оврагов различного типа (2 приводораздельных, придолинный, вершинный, донный и пойменный), развивающихся в пределах 6 ключевых участков, где их водосборные площади заняты преимущественно пахотными угодьями. Целью исследований является выявление связи между линейным, площадным и объемным приростом оврагов в зависимости от их морфолого-морфометрических характеристик. Для большинства рассматриваемых оврагов максимальные размыты наблюдались в 2001 г., когда линейные приросты вершин достигали 13.8–21.8 м (среднее арифметическое за весь период наблюдений – 0.68–3.45 м), площадные варьировались в пределах – от 25.1 до 436.7 м², (среднее арифметическое – 11.12–109.02 м²), а объемные, соответственно – от 398 до 3068 м³, (среднее арифметическое – 27.52–889.80 м³), но были и исключения, когда линейные приросты имели максимум в 2011 г., например, приводораздельный овраг № 1 (2.3 м) и вершинный овраг № 4 (3.25 м). По всем типам оврагов рассчитаны основные статистические показатели величин линейного, площадного и объемного приростов за исследуемый период. Установлено, что в большинстве случаев проявляется отчетливая зависимость между рассматриваемыми показателями, что наиболее характерно для пойменного оврага с коротким (2013–2021 гг.) периодом наблюдения. Здесь связь линейного прироста с площадным ($r = 0.985$) и объемным ($r = 0.984$) размытами оказалась очень высокой. Достаточно высокой получилась связь линейного прироста с площадным ($r = 0.819$) и объемным размытами ($r = 0.792$) у донного одновершинного оврага на участке “Курегово”. Высокая положительная связь линейного прироста с площадным ($r = 0.792$) и объемным размытами ($r = 0.756$) отмечена у придолинного оврага на правом склоне долины реки Вятки (“Крымская Слудка”). Умеренная связь линейного прироста с площадным ($r = 0.629$) и объемным размытами ($r = 0.429$) оказалась у приводораздельного одновершинного оврага на ключевом участке “Вятское”. Очень слабая положительная связь линейного прироста с площадным ($r = 0.348$) и объемным размытами ($r = 0.326$) обнаружилась у приводораздельного оврага, растущего тремя вершинами на участке “Кулюшево”. Не обнаружена связь линейного прироста как с площадным ($r = 0.280$), так и с объемным размытами ($r = 0.289$) только у вершинного оврага (“Варзи-Ятчи”), растущего в верховьях днища голоценовой балки тремя вершинами, что объясняется более интенсивным развитием его отворшков в результате появления новых ложбин стока из-за сельскохозяйственной деятельности. Для всех рассматриваемых оврагов выявлена очень высокая связь между площадным и объемным приростом ($r = 0.969 \pm 0.074$). Асинхронность линейного, площадного и объемного приростов исследуемых оврагов не всегда связана с климатическими факторами, что можно объяснить влиянием склоновых процессов, а в некоторых случаях и суффозией. Выявлены плавное изменение по годам площадного и объемного размытов и достаточно резкое колебание величин линейного прироста вершин оврагов, независимо от типа и их морфолого-морфометрических особенностей.

Ключевые слова: морфометрия оврагов, инструментальная съемка, многолетний мониторинг, статистический и корреляционный анализ

DOI: 10.31857/S0435428122040058

ВВЕДЕНИЕ

Овражная эрозия — один из наиболее опасных природно-техногенных рельефообразующих процессов, наносящих большой ущерб земледелию и окружающему ландшафту. Продукты смыва с водоразделов и размыва самих оврагов переносятся по ним и поступают в русла временных и постоянных водотоков, вызывая заиливание рек и водохранилищ (Рысин, 1998; География..., 2006). Овражная эрозия вызывает также сокращение площадей пахотных земель, разрушение строений, коммуникаций и т.п. К основным причинам развития оврагов относятся нерациональное землепользование (Григорьев, Рысин, 2006) и все возрастающая техногенная нагрузка на окружающую среду (строительство дорог и трубопроводов, уничтожение естественной растительности, неконтролируемый сброс воды и т.п.) (Григорьев, 2011; Рысин и др., 2015; Григорьев, Рысин, 2017).

Для оценки активности роста оврагов обычно используются инструментальные измерения линейного прироста — среди всех методов наиболее простые и наименее затратные. В их основу положено измерение расстояний от вершины оврага до предварительно установленного репера или нескольких реперов, расположенных по линии роста оврага, а также до отдельных деревьев, столбов или строений (Назаров, 1992; Болысов, Тарзаева, 1996; Рыжов, 1998; Григорьев, 2009).

В полевых условиях оценка обычно производится визуально (рекогносцировочные работы и качественная оценка изменений на исследуемых участках (Рычагов, 2006) и инструментально. Современные полевые инструментальные методы позволяют с высокой точностью оценивать изменения параметров оврагов (длины, глубины, площади, объема и т.п.). Линейные измерения долгое время оставались основным и наиболее точным способом оценки линейного прироста вершин оврагов (Коротина, 1981; Дедков и др., 1993; Зорина и др., 1993), но даже при использовании нескольких реперов невозможно оценить их площадной и объемный прирост. 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.

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. Овраги выбирались с учетом местоположения в рельефе и охвата различных ландшафтных усло-

вий. На момент начала мониторинговых наблюдений в 1978 г. овраги находились на различных стадиях развития, но все продолжали расти в длину. В первые годы наблюдений количество наблюдаемых вершин оврагов составляло 120 (Рысин, 1998). В дальнейшем появившиеся на участках наблюдений новые овраги и активно растущие отвершки оврагов также были включены в сеть наблюдений (Рысин, 1998). Одновременно расширение сети мониторинга происходило за счет включения в него оврагов на новых участках. В настоящее время в систему мониторинга агрогенных оврагов входят 168 вершин оврагов различного типа, которые сгруппированы на 28 ключевых участках, расположенных в различных ландшафтных условиях в пределах территории Удмуртской Республики (УР).

Начиная с 2000-х годов, нами проводятся ежегодные измерения линейного, площадного и объемного прироста вершинной части ряда активно растущих оврагов (рис. 1). Среди них были выбраны шесть оврагов, отличавшихся активным ежегодным линейным, площадным и объемным приростом. На большинстве же других оврагов, где также велась 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 и возможности.

Поскольку до сих пор мы анализировали в основном развитие овражной эрозии на основе линейного прироста вершин оврагов, то в данной статье мы впервые публикуем результаты анализа линейного, площадного и объемного прироста за многолетний период наиболее активно растущих оврагов, полученных с применением инструментальных методов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах территории УР распространены ландшафты южной тайги и подтаежной зоны, сильно преобразованные хозяйственной деятельностью. Междуречные пространства сложены лессовидными делювиально-солифлюкционными суглинками, тогда как в днищах балок, прорезаемых донными оврагами, накапливаются тяжело-суглинистые отложения, смытые с приводораздельных склонов. Ряд придолинных и приводораздельных оврагов формируются в верхнепермских глинах, иногда с прослоями более прочных пород (известняков, аргиллитов, песчаников и т.п.) (Григорьев, Рысин, 2021).

На исследуемой территории 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

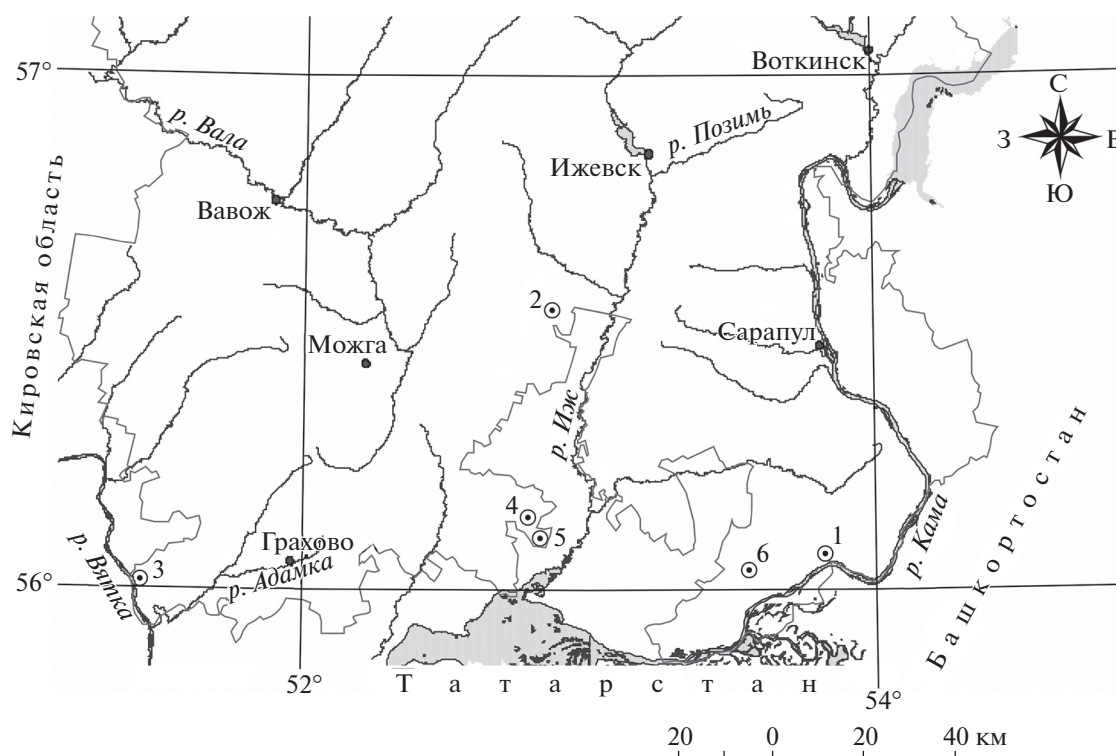


Рис. 1. Расположение ключевых участков по мониторингу линейного, площадного и объемного приростов различных типов оврагов в пределах территории Удмуртской Республики. Цифрами обозначены номера оврагов и ключевых участков.

Fig. 1. Location of key areas for monitoring linear, area and volume growth of various types of ravines within the territory of the Udmurt Republic. Numbers indicate the numbers of ravines and key areas.

+18.3 — +19.7°C, соответственно, с выраженным трендом повышения зимних температур воздуха в зимние месяцы (Переведенцев и др., 2019; Переведенцев и др., 2020). Устойчивый снежный покров держится 155–175 дней. Среднегодовая сумма осадков составляет 500–650 мм (Атлас..., 2016). В связи с теплыми зимами уменьшается глубина промерзания почв. Результаты анализа по 8 метеостанциям УР за 1973–2018 гг. показали положительный тренд опасных гидрометеорологических явлений (смерчи, сильные ливни и др.) (Переведенцев и др., 2019). На интенсивность роста оврагов в Удмуртии в последние десятилетия сильнее всего влияет климатический фактор (Рысин и др., 2017).

Второй важный фактор, определяющий развитие овражной эрозии, — характер землепользования. В 1955 г. площадь пашни в УР 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 рес-

публики сократились с 739 до 406 тыс. га и соответственно возросла площадь кормовых культур до 613 тыс. га (табл. 1) (Акмаров и др., 2014). По данным статистического сборника в 2018 г. площадь посевных площадей во всех категориях хозяйств УР вновь уменьшилась и составила 71.3% по отношению к 1990 г. Площади под кормовыми культурами остались практически на прежнем уровне (Сельское..., 2019).

Морфометрические характеристики шести активно растущих оврагов, где осуществлялась тахеометрическая съемка, представлены в табл. 2. Они были получены по крупномасштабным топографическим картам (1: 10000) и данным полевых инструментальных измерений (Рысин, 1998).

Все овраги, входящие в сеть мониторинга, делятся на две группы: первичные и вторичные. Первичные овраги, в свою очередь, нами разделены на три типа: приводораздельные, к которым отнесены все овраги, развивающиеся на склонах междуречных пространств, а также прибалочные и придолинные, которые различаются по месту своего развития на бортах балок и речных долин (террас) соответственно. К вторичным отнесены донные (в днищах балок), вершинные (в верши-

Таблица 1. Динамика посевных площадей сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий УР (тыс. га)
Table 1. Dynamics of sown areas of agricultural crops in farms of all categories of the Republic of Udmurtia (thousand hectares)

Показатель	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2010 г. в % к 1990 г.
Вся посевная площадь	1401	1272	1152	1168	1072	76.52
в том числе зерновые и зернобобовые культуры	739	677	538	468	456	61.7
технические культуры	18	8	9	15	9	50.00
картофель и овощи	50	60	59	56	44	88.00
кормовые культуры	594	527	546	629	613	103.20

нах древних эрозионных форм) и пойменные овраги.

Приводораздельный (склоновый) овраг № 1 находится на ключевом участке “Вятское”, между населенными пунктами Вятское и Кухтино Каракулинского района в верховьях р. Северянка. Суммарный прирост вершины оврага за 1978–1999 гг. составил 28.9 м, а за 2000–2021 гг. – 20.5 м. Максимальный годовой линейный прирост за весь период наблюдений был зарегистрирован в 1991 г. и достиг 2.9 м. Овраг растет одной языковидной вершиной (рис. 2 (а)); высота вершинного уступа в 2021 г. немного уменьшилась по сравнению с 2017 г. (Григорьев, Рысин, 2021) и составила 2.4 м, аналогично уменьшилась и ширина при вершине – 7.4 м.

Донный овраг № 2 находится в 700 м к северо-востоку от северной окраины д. Курегово Малопургинского района, в 35 км к юго-западу от центра г. Ижевск. Длина днища размываемой балки на данном участке около 400 м, а общая площадь ее водосбора – 0.68 км². Средняя высота водосбора – 167 м (по данным топографической карты масштаба 1: 25000), размах высот рельефа – 76 м (Гусаров и др., 2019). Овраг имеет одну вершину (рис. 2 (б)) и размывает балочный аллювий суглинистого механического состава. Площадь водосбора оврага при вершине 24 га (табл. 2). Установлено, что за период тахеометрической съемки 2000–2021 гг. суммарный прирост вершины оврага равнялся 51.6 м, что немного меньше, чем за предыдущий (1978–1999 гг.) период наблюдений (56.6 м) с максимальным линейным приростом, отмеченным в 1991 г. – 4.7 м. Высота вершинного уступа варьирует в последние годы в пределах 1.8–1.3 м, а ширина на расстоянии 3 м от вершины изменяется незначительно – 5.6–5.2 м. За последние 5 лет глубина и ширина оврага при вершине постепенно уменьшаются.

Придолинный (склоновый) овраг № 3 находится в с. Крымская Слудка Кизнерского района и размывает плейстоценовый перигляциальный аллювий террасы р. Вятки. Древний аллювий

сложен опесчаненными желто-бурыми с палевым оттенком лессовидными суглинками и легко размывается не только оврагами, но и руслом реки (рис. 2 (в)). Если длина оврага в 2004 г. была порядка 60 м, то в настоящее время в результате размыва рекой берегового уступа она сократилась до 27 м. Максимальная величина руслового размыва на этом участке за 2000–2021 гг. превышала 70 м, а суммарный прирост оврага доходил до 65.8 м. Высота уступа вершины оврага уменьшилась до 1.8 м; ширина оврага при вершине 9.2 м.

Вершинный (донный) овраг № 4 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 (142 га) и на протяжении длительного времени имел 2 вершины, а с 2008 г. появилась третья, которая достаточно активно развивается в последние годы (рис. 2 (г)). Суммарный прирост вершины оврага за последние 22 года наблюдений достиг всего 25.1 м, а за предыдущий период (1978–1999 гг.) овраг вырос на 253.6 м. Максимальные годовые приросты были отмечены в 1979 г. (84.6 м) и в 1990 г. (28.2 м). Ширина оврага при вершине (уступ 1.4 м) в 2021 г. составила 12.5 м. За последние годы ширина оврага немного увеличилась, а глубина уменьшилась.

Пойменный овраг № 5 расположен в 500 м к СВ от юго-восточной окраины д. Юмьяшур Алнашского района. Овраг возник на левобережной высокой пойме р. Варзинка (ширина 150–300 м) вследствие прорывов земляной запруды в устье балки, созданной с целью накопления талых вод для водопоя скота. Овраг имеет значительную площадь водосбора, совместно с балочным она составляет 164 га. Абсолютная высота ближайшего водораздела равна 162.6 м, а урез реки, где возник овраг, находится на отметке 70 м. Глубина местного базиса эрозии 92.6 м. Превышение вершины оврага относительно его устья – 8 м (табл. 2). Суммарный линейный прирост оврага за 2008–2021 гг. 96 м, а в первый год прорыва земляной запруды в 2007 г. он вырос на 53 м. Второй макси-

Таблица 2. Морфометрические характеристики активно растущих оврагов и их водосборов на ключевых участках в Удмуртии**Table 2.** Morphometric characteristics of actively growing ravines and their catchments in key areas in Udmurtia

Номер оврага, ключевой участок	Тип оврага*	Длина оврага, м	Кол-во вершин	Абс. отметка устья оврага, м	Абс. отметка вершины оврага, м	Падение оврага**, м	Средний уклон оврага, м/км	Длина линии стока, м	Абс. отметка 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 район)	ПВ	300	1	135	157	22	87	1120	186	26	37	51	16.5
№ 2 – “Курегово”, площадь 2.4 км ² (Малопургинский район)	Д	533	1	119	132	17	32	1100	195	57	49	76	24
№ 3 – “Крымская Слудка”, площадь 3.2 км ² (Кизнерский район)	ПД	120	1	53	87	34	25	1060	100	12	14	47	13.6
№ 4 – “Варзи-Ятчи”, площадь 8.5 км ² (Алнашский район)	В	215	3	102.5	106	3.5	16	1750	145	22	22	55	142
№ 5 – “Юмьяшур”, площадь 6.1 км ² (Алнашский район)	П(Т)	149	3	70	78	8	53	1900	162.6	44	45	92.6	164
№ 6 – “Кулюшево”, площадь 4.7 км ² (Каракулинский район)	ПВ	520	3	125	160	35	67	780	197.5	48	56	83.5	18.8

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

мум прироста был зарегистрирован на следующий 2008 г. (38 м), что было связано с повторным прорывом дамбы. Общая длина оврага 149 м. До 2011 г. овраг активно рос одной вершиной, в 2012 г. появилась вторая вершина, а с 2013 г. растут три отвершка и в последние годы более активно развивается южный отвершек (рис. 2 (д)). Максимальная глубина оврага при вершине в 2021 г. составила 2.3 м, а ширина в трех метрах от вершины – 7.8 м. Глубина оврага в последние годы уменьшается, а ширина, наоборот, – возрастает.

Приводораздельный (склоновый) овраг № 6 расположен в 1250 м на СВ от центра с. Кулюшево Каракулинского района. Овраг первоначально возник на крутом левом склоне долины р. Кобылки (правый приток Камы) и относился к придолинному типу, в последние 2 десятилетия вершина его вышла за пределы бровки склона долины и стала размывать плотный глинистый элювий коренных пород в средней части приводораздельно-

го склона. Суммарный линейный прирост вершины оврага за 2000–2021 гг. составил 15 м, а за период с 1978 по 1999 г. овраг вырос на 18.3 м. Овраг растет тремя вершинами (рис. 2 (е)). В 2021 г. высота вершинного уступа главного оврага составляла 1.3 м, ширина его при вершине – 7.6 м. Водосборные площади практически всех наблюдаемых оврагов представлены обрабатываемыми пахотными угодьями, при этом вершины первичных оврагов практически вплотную подходят к пашне.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для более детального изучения динамики развития оврагов используются геодезическая съемка с помощью электронного тахеометра (Сатдаров, 2016; Гусаров и др., 2019) и съемка с помощью наземного лазерного 3D-сканера (Usmanov et al., 2015). Использование наземного лазерного

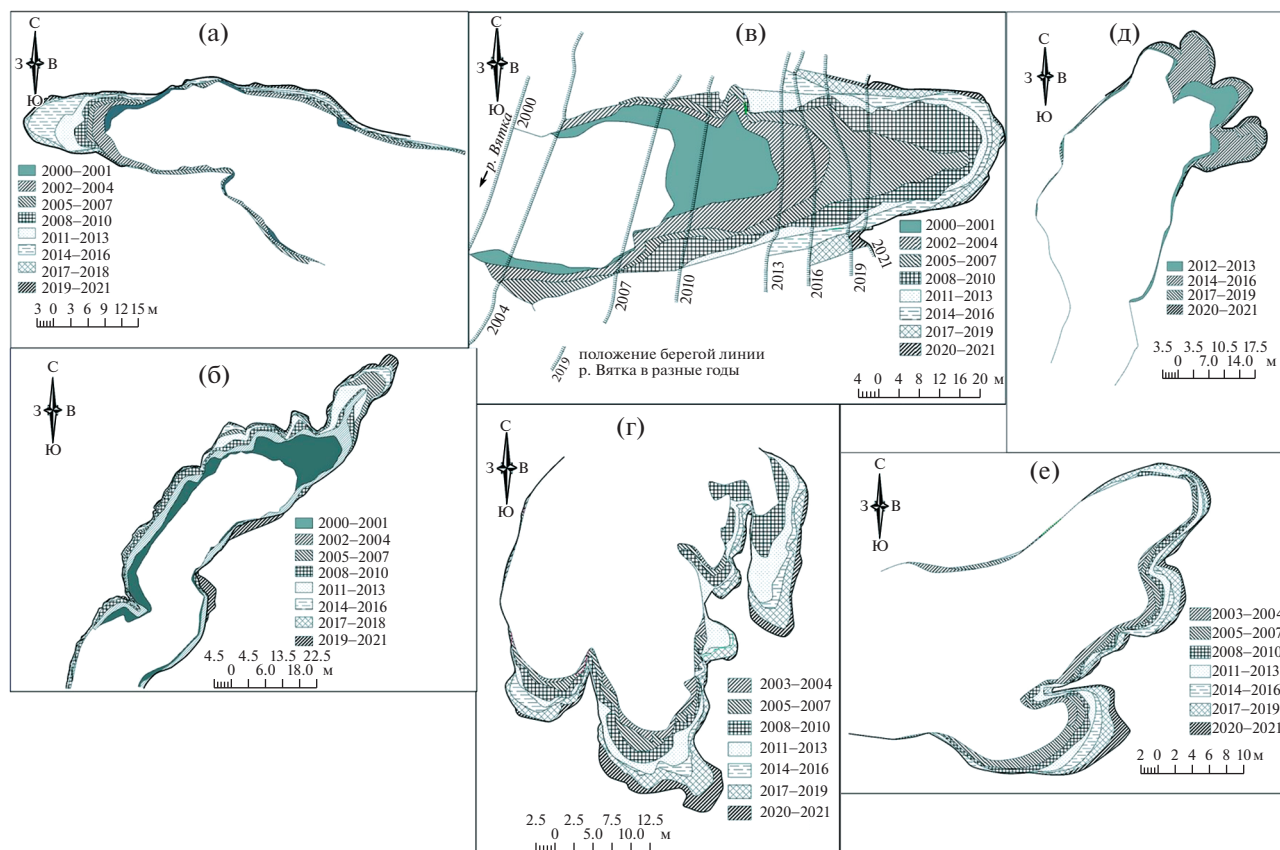


Рис. 2. Схемы линейного и площадного приростов верховьев оврагов: (а) — овраг № 1 (2000–2021 гг.), (б) — овраг № 2 (2000–2021 гг.), (в) — овраг № 3 (2000–2021 гг.), (г) — овраг № 4 (2003–2021 гг.), (д) — овраг № 5 (2012–2021 гг.), (е) — овраг № 6 (2003–2021 гг.).

Fig. 2. Schemes of linear and area growth of the headwaters of ravines: (a) — ravine No. 1 (2000–2021), (б) — ravine No. 2 (2000–2021), (в) — ravine No. 3 (2000–2021), (г) — ravine No. 4 (2003–2021), (д) — ravine No. 5 (2012–2021), (е) — ravine No. 6 (2003–2021).

3D-сканера позволяет достигать точности до долей миллиметра (Гафуров, Усманов, 2016) и создавать трехмерную модель изучаемого объекта. Оценка скорости оврагов проводится различными методами, что зависит от периода времени, для которого проводятся исследования и требуемой точности конечных оценок. Обычно выделяются короткий (1–10 лет) (Frankl et al., 2015; Marzolf et al., 2011) и длинный (более 10 лет) временные интервалы наблюдений (Rishikeshan et al., 2014; Li et al., 2016). В первом случае при измерениях линейного прироста вершин оврагов применяют репера и (Гусаров и др., 2019) и беспилотные летательные аппараты (Гафуров и др., 2018), измерения объемов ведутся с использованием наземного лазерного сканирования (Kosciuba et al., 2015; Caraballo-Arias, 2016), фотограмметрии и повторных DGPS измерений (для создания цифровой модели рельефа) (Khoboso et al., 2016; Гафуров и др., 2018, Chen et al., 2019). Точные методы используются обычно при исследовании механизма процессов или, когда требуется

максимально повысить точность значений площадного и объемного приростов.

Топографо-геодезические работы, проводимые при изучении регрессивного роста оврагов, заключаются в высокоточной (± 0.01 м) тахеометрической съемке вершин, размываемых уступов, их бровок и тальвегов. На основе повторной тахеометрической съемки оцениваются линейный прирост и изменения плановой конфигурации бровок и тальвегов, их поперечного сечения по длине оврага.

Тахеометрическая съемка проводилась нами вначале с помощью отечественных оптических теодолитов Т30 и 2Т30, а с 2001 г. начали применяться лазерные электронные тахеометры, которые отличаются простотой эксплуатации и надежным программным обеспечением — “Trimble 3305”, затем “Nicon NPR-332” с точностью измерений до 3 мм и 3 угловых секунд.

В наших исследованиях подсчитывался объем выносимого материала в пределах активно размываемой вершинной части оврагов. В большин-

стве случаев активно размываемая часть оврага совпадает с фрагментом, на котором производится тахеометрическая съемка (рис. 2). На данном участке практически нет аккумуляции размываемых материалов. Устьевые части оврагов с возможными конусами выноса и аккумуляция наносов в средних и нижних ее частях не исследовались.

Объемный прирост оврагов определялся двумя методами:

1) классический метод с помощью построения поперечных профилей через равные расстояния (5–10 м) электронным тахеометром. С помощью программного комплекса “Кредо” (Россия) создается цифровая модель рельефа (ЦМР) (метод триангуляции). Объем определяется как разница двух поверхностей — по бровке и по дну. Результатом является картограмма вычисления объема или по сетке квадратов или по контуру. Получаемый объем сравнивается с объемом за предыдущий год. Полученная разница и будет объемом вынесенного материала за текущий календарный год (Григорьев, 2009);

2) фотограмметрический метод с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Результат обработки снимков БПЛА в программе Agisoft Metashape (Россия) — ортофотоплан и цифровая модель рельефа, жестко привязанная к требуемой системе координат (условная СК при использовании своих реперов или МСК-18 при использовании ГНСС-приемников EFT M1 (Россия). В дальнейшем ортофотоплан можно использовать в качестве подложки для проведения линейных измерений в различных ГИС (MapInfo, ArcGis и т.п.) и САПР (Автокад, Кредо). ЦМР можно использовать для вычисления объемов в Кредо (1 метод). Фотограмметрический метод используется в наших исследованиях с 2019 г.

Для всех рассматриваемых 6 оврагов вначале были рассчитаны корреляционные связи между ежегодными линейными, площадными и объемными величинами их прироста на каждом из ключевых участков. На втором этапе были установлены корреляционные связи между величинами прироста оврагов и гидрометеорологическими факторами за период с 2000 по 2017 г. (Григорьев, Рысин, 2021).

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 Блекмана и Фишера (Лакин, 1990).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Линейный прирост приводораздельного оврага № 1 за рассматриваемый период изменялся от нулевого значения в 2005 г. до 2.3 м в 2011 г., значения же площадного прироста варьировали от 1.5 м² в 2020 г. до 25.4 м² в 2003 г. Основные статистические характеристики линейного и площадного приростов приведены в табл. 3 и 4.

Анализ табличных данных показывает, что медианные значения линейного и площадного приростов в целом близки к среднеарифметическим только для приводораздельных и вершинных оврагов. В случае же донных, придолинных и пойменных оврагов они значительно ниже, т.е. совокупность неоднородна и содержит экстремальные значения, что подтверждается варьированием минимальных и максимальных значений и стандартным отклонением. Асимметрия во всех случаях является положительной, т.е. в распределении чаще встречаются значения меньше среднего. По полученным значениям эксцесса видно, что графики распределения линейного и площадного прироста по большинству типов оврагов являются островершинными, исключением служат лишь приводораздельные. По высоким значениям коэффициента вариации можем судить о качественной неоднородности всех рассматриваемых типов оврагов.

Корреляционный анализ показателей линейного и площадного приростов данного оврага показал наличие не высокой, но надежной связи между ними ($r = 0.629$; $\eta = 0.525$; $\eta^2 = 0.276$). В целом отмечается достаточно плавное изменение площадного прироста, в отличие от линейного; для последнего характерна более резкая амплитуда изменения величин по годам. Асинхронными были изменения рассматриваемых показателей в 2003, 2006, 2013 и 2021 г. (рис. 3 (а)).

Связь же линейного прироста с объемным оказалась более слабой ($r = 0.429$; $\eta = 0.477$; $\eta^2 = 0.228$), что подтверждают и соответствующие графики (рис. 4 (а)). При анализе графиков видно, что асинхронными были изменения соответствующих показателей в 2003, 2006, 2011, 2013 и 2021 г. В отличие от линейного и площадного приростов, объем размыва в 2011 г. по сравнению с предыдущим годом несколько снизился, что и отражается на графике. Уменьшение объемного прироста легко объяснить уменьшением глубины размыва и преобладанием аккумуляции в днище оврага по сравнению с предыдущим годом. С другой стороны, очевидна очень высокая связь между площадным и объемным приростом оврага за рассматриваемый период ($r = 0.852$). Площадной и объемный размывы находятся в более тесной зависимости между собой, чем с линейным размывом, что подтверждается и на других оврагах. Вариация по годам величин площадного и объем-

Таблица 3. Статистические показатели линейного прироста оврагов за многолетний период
Table 3. Statistical indicators of linear growth of ravines for a long-term period

№ оврага	Тип оврага*	Среднее арифметическое	Станд. ошибка	Медиана	Минимум	Максимум	Станд. отклонение	Экспесс	Асимметричность	Коэффициент вариации
1	ПВ	0.88	0.14	0.85	0.0	2.3	0.64	−0.06	0.54	0.72
2	Д	2.46	0.79	1.3	0.05	13.8	3.62	6.16	2.58	1.47
3	ПД	3.45	1.39	1	0.2	21.8	6.38	5.81	2.61	1.84
4	В	1.06	0.15	0.95	0.26	3.25	0.63	8.65	2.53	0.59
5	П	2.74	0.89	1.8	0.3	8.1	2.66	0.99	1.43	0.97
6	ПВ	0.68	0.1	0.6	0.05	1.5	0.44	−0.40	0.49	0.64

* — условные обозначения типов оврагов см. в табл. 2.

Таблица 4. Статистические показатели площадного прироста оврагов за многолетний период
Table 4. Statistical indicators of area growth of ravines for a long-term period

№ оврага	Тип оврага	Среднее арифметическое	Станд. ошибка	Медиана	Минимум	Максимум	Станд. отклонение	Экспесс	Асимметричность	Коэффициент вариации
1	ПВ	14.40	1.67	14.7	1.5	25.7	7.64	−0.73	−0.35	0.53
2	Д	50.20	15.05	30.9	0	315	68.98	11.34	3.11	1.37
3	ПД	109.02	22.88	62	0	436.7	104.83	3.59	1.74	0.95
4	В	24.51	3.62	21.35	5.2	66.8	15.35	2.31	1.38	0.63
5	П	41.79	13.35	20.8	1	112.8	40.06	0.01	1.17	0.96
6	ПВ	11.12	1.43	9.15	3.7	25.1	6.06	0.52	1.13	0.54

ного размывов может быть обусловлена чередованием преобладания бокового размыва с глубинным, что не всегда бывает синхронным, а иногда и асинхронным.

Основные статистические показатели объемного прироста оврагов за исследуемый период приведены в табл. 5. Анализ табличных данных показывает, что статистические показатели объемного прироста в целом близки к показателям площадного прироста оврагов (табл. 4). Отличием здесь является отсутствие отрицательных значений эксцесса и асимметричности, что характеризует более сглаженное распределение данного показателя. Практически не отличаются и показатели коэффициента вариации.

Линейный и площадной приросты вершинной части донного оврага № 2 за рассматриваемый период имеют общую тенденцию к затуханию (рис. 3 (б)). Максимальный прирост отступления вершины оврага 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. 2 (б)). 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 поверхностей, где он развивается. Так, в днище исследованного нами водосбора балки в 2001 и 2003 г. темпы прироста вершины 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 суффозии в днище долины балки непосредственно выше по течению от его вершины. Аналогичный процесс оврагообразования был описан и на Боровском полигоне МГУ им. М.В. Ломоносова при стационарных наблю-

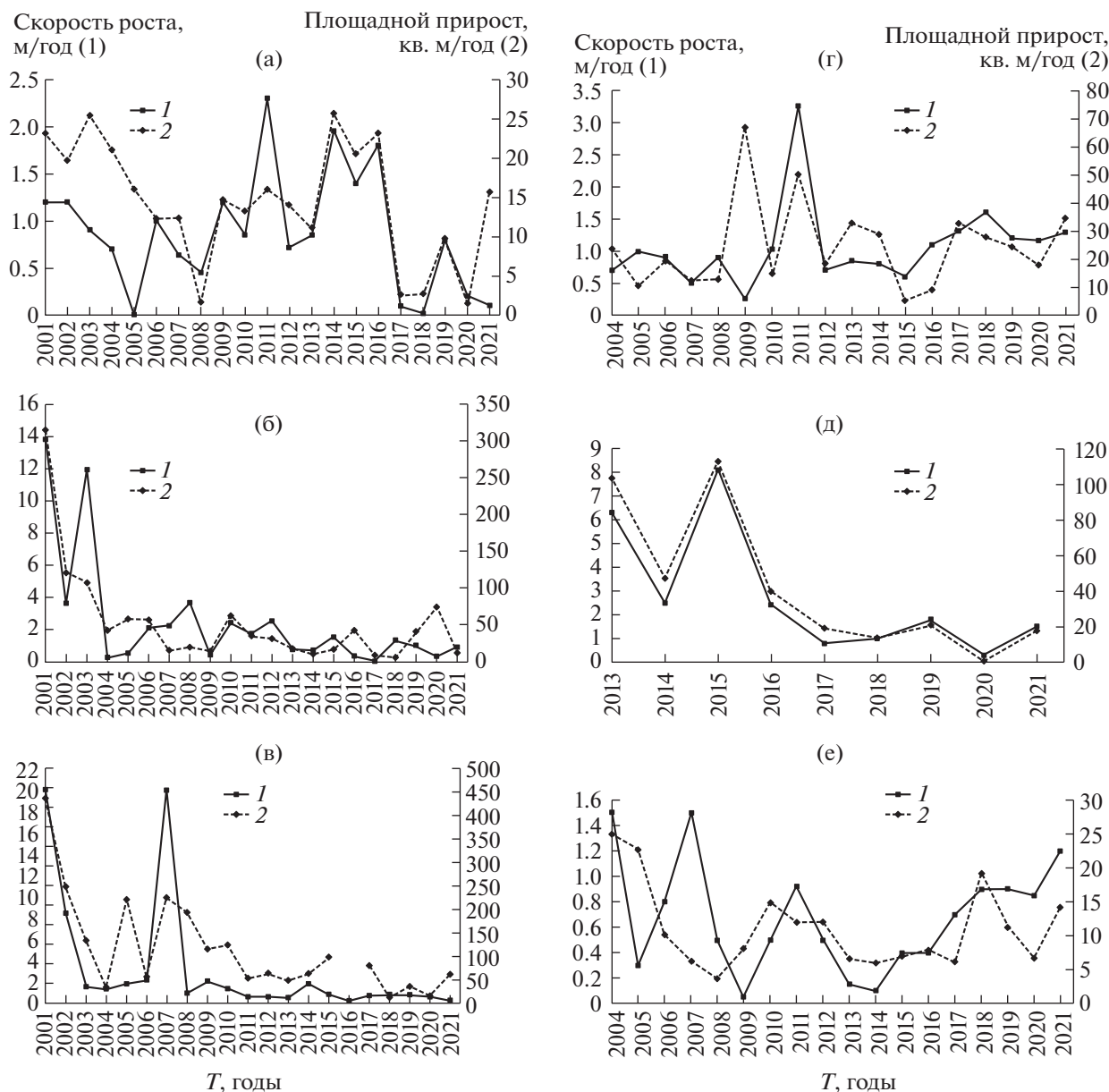


Рис. 3. Графики изменения линейного (1) и площадного (2) прироста вершинной части оврагов: (а) — овраг № 1 (2001–2021 гг.), (б) — овраг № 2 (2001–2021 гг.), (в) — овраг № 3 (2001–2021 гг.), (г) — овраг № 4 (2004–2021 гг.), (д) — овраг № 5 (2013–2021 гг.), (е) — овраг № 6 (2004–2021 гг.).

Fig. 3. Graphs of changes in linear (1) and area (2) growth of the apical part of the ravines: (a) — ravine No. 1 (2001–2021), (б) — ravine No. 2 (2001–2021), (в) — ravine No. 3 (2001–2021), (г) — ravine No. 4 (2004–2021), (д) — ravine No. 5 (2013–2021), (е) — ravine No. 6 (2004–2021).

дениях с 1985 по 1999 г. (Веретенникова и др., 2003). 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). Аналогичная ситуация была отмечена в 2020 г.,

когда при линейном приросте 0.3 м площадной прирост был почти в 2 раза выше предыдущего случая (73.6 м²), что возможно объяснить лишь за счет размыва или обрушения нависающих карнизов бровок на его склонах (рис. 3 (б)). Несмотря на это, корреляционный анализ показал, что связь между линейным и площадным приростом вершинной части оврага оказалась достаточно высокой ($r = 0.819$, $\eta = 0.577$, $\eta^2 = 0.332$), что обычно характерно для одновершинных оврагов.

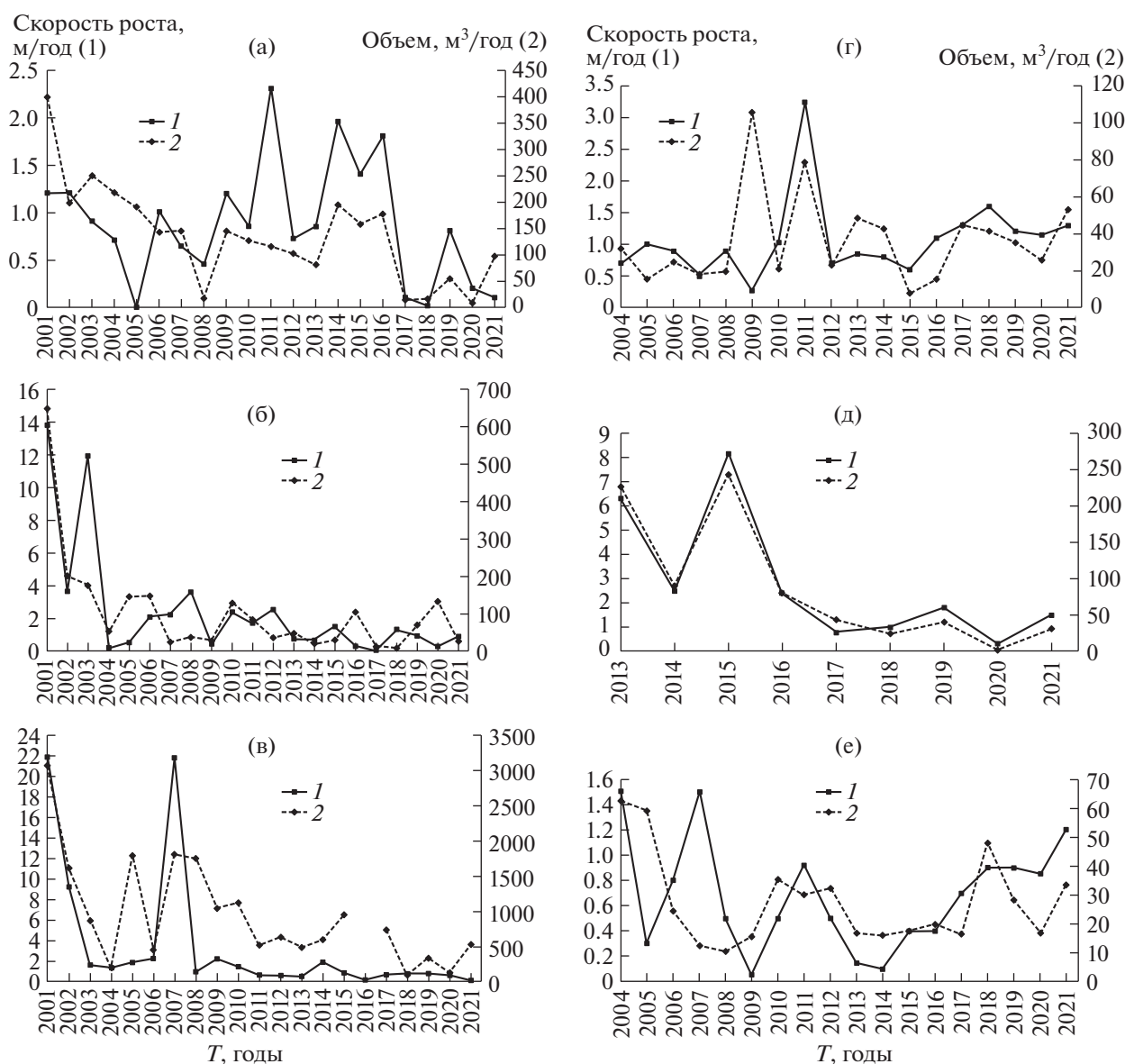


Рис. 4. Графики изменения линейного (1) и объемного (2) прироста вершинной части оврагов: (а) – овраг № 1 (2001–2021 гг.), (б) – овраг № 2 (2001–2021 гг.), (в) – овраг № 3 (2001–2021 гг.), (г) – овраг № 4 (2004–2021 гг.), (д) – овраг № 5 (2013–2021 гг.), (е) – овраг № 6 (2004–2021 гг.).

Fig. 4. Graphs of changes in the linear (1) and volumetric (2) growth of the vertex part of the ravines: (a) – ravine No. 1 (2001–2021), (б) – ravine No. 2 (2001–2021), (в) – ravine No. 3 (2001–2021), (г) – ravine No. 4 (2004–2021), (д) – ravine No. 5 (2013–2021), (е) – ravine No. 6 (2004–2021).

Аналогичная картина наблюдается при сопоставлении линейного и объемного прироста оврага (рис. 4 (б)). Максимальные объемы размыва отмечены в годы с наибольшим линейным приростом, исключением, как и в предыдущем случае, являются 2004 и 2020 г., когда при минимальных линейных приростах были зафиксированы достаточно высокие значения объемного прироста. Корреляционный анализ выявил высокую связь между линейным и объемным приростом оврага за 21-летний период ($r = 0.786$, $\eta =$

$= 0.527$, $\eta^2 = 0.278$). Соответственно, связь между площадным и объемным приростом оврага за рассматриваемый период оказалась очень высокой ($r = 0.989$).

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. 3 (в)). Вы-

Таблица 5. Статистические показатели объемного прироста оврагов за многолетний период
Table 5. Statistical indicators of volume growth of ravines for a long-term period

№ оврага	Тип оврага	Среднее арифметическое	Станд. ошибка	Медиана	Минимум	Максимум	Станд. отклонение	Экцесс	Асимметричность	Коэффициент вариации
1	ПВ	135.05	20.35	142	8	398	93.26	1.83	0.88	0.69
2	Д	99.44	30.38	48.1	0	646.8	139.24	12.72	3.29	1.40
3	ПД	889.80	163.97	636	0	3068	751.42	2.10	1.35	0.84
4	В	36.24	5.80	28.7	7.7	106.1	24.59	2.95	1.63	0.68
5	П	86.87	29.35	43.3	2.6	242.8	88.08	0.13	1.25	1.01
6	ПВ	27.52	3.66	22	10.5	62.7	15.53	0.60	1.19	0.56

сокий 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 противоэрозионной земляной дамбы с водопропускной трубой диаметром около 700 мм. Рост вершины в основном происходил за счет обрушения крутых вершинных уступов или нависающих карнизов, а прирост площади и объема был связан с размывом и обрушением крутых склонов оврага, частично вызванных и боковым размывом реки Вятки в период половодья. На графике отчетливо прослеживается синхронность между значениями линейного и площадного прироста, исключениями являются лишь 2006, 2009, 2015 и 2021 г. Зависимость между рассматриваемыми показателями также оказалась высокой ($r = 0.792$, $\eta = 0.514$, $\eta^2 = 0.265$), что является характерным, как и в предыдущем случае, для одновершинных оврагов, независимо от типа и особенностей их водосборных площадей.

График изменения линейного и объемного прироста по характеру рисунка почти тождественен предыдущему: высокие значения объемов размыва были отмечены в 2001 и 2007 г., а минимальные — в 2018 и 2020 г. (рис. 4 (в)). Совпадают также и годы, когда изменения линейного прироста оврага были синхронны или, наоборот, асинхронны объемному размыву. Корреляционная связь между рассматриваемыми показателями также оказалась высокой ($r = 0.756$, $\eta = 0.337$, $\eta^2 = 0.113$). Не вызывает сомнений и очень высокая корреляционная связь между площадным и объемным приростом оврага за анализируемый период ($r = 0.984$).

На графике связь между линейным и площадным приростом вершинной части оврага № 4 проявляется недостаточно четко (рис. 3 (г)).

Здесь, в отличие от предыдущих оврагов, максимальный линейный прирост был зарегистрирован в 2011 г. (3.3 м), а наибольший прирост площади был в 2009 г., но и в 2000 и 2001 г. линейные приросты были существенными и чуть превышали 2 м. Как показывает график, вершинный овраг имеет тенденцию к активизации за 2015–2021 гг., при этом высокий прирост был отмечен в 2018 г. (1.6 м), в последующие 2 года темпы роста немного снизились, а в 2021 г. вновь отмечается активизация (1.3 м). Здесь необходимо отметить, что в последний год наблюдения значения площадного и объемного приростов оказались выше, чем в 2018 г. Тенденция активизации развития вторичных (донных и вершинных) оврагов обнаруживается и на других ключевых участках УР. 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 зим, в днищах сухих долин, где формируются донные врезы, в период снеготаяния происходит выклинивание внутрисочвенного стока. Именно он в основном формирует временные водотоки, способствующие постепенному регрессивному отступанию вершин донных оврагов (Рысин и др., 2017). Исследования 90 овражных систем в Португалии также показали, что они выросли в основном за счет массовых размывов отложений в привершинных и боковых стенках, под влиянием подповерхностных вод (Rafaello, Reis, 2016).

Анализ графика показывает, что вариации линейного и площадного приростов вершинного оврага в 2005, 2006, 2009 и 2018 г. были асинхронными, при этом максимум отмечен в 2009 г. Статистический анализ между линейным и площадным приростом оврага за рассматриваемый период подтвердил отсутствие достоверной положительной связи между ними ($r = 0.280$, $\eta = 0.864$;

$\eta^2 = 0.746$), что хорошо видно и на графике (рис. 3 (г)).

Выше рассмотренный график по внешнему виду практически не отличается от графика связи линейного и объемного прироста оврага (рис. 4 (г)). Здесь также максимальный объем размыва был отмечен в 2009 г. и связан с активным развитием отвершков в восточной части от основного оврага, при этом отмечались увеличение и глубины размыва. В результате чего корреляционный анализ показал отсутствие связи между линейным и объемным приростом оврага ($r = 0.289$, $\eta = 0.866$; $\eta^2 = 0.750$).

В отличие от выше рассмотренных связей, зависимость между площадным и объемным приростом оврага оказалась весьма высокой, как и на других ключевых участках ($r = 0.995$), что является очевидным.

Анализ графика (рис. 3 (д)) свидетельствует о синхронности изменений линейного и площадного приростов пойменного оврага № 5 за последние 9 лет (2013–2021 гг.). Максимальные линейные приросты были отмечены в 2013 (6.3 м) и в 2015 г. (8.1 м), затем скорости постепенно снижаются, достигая минимума в 2020 г. (0.3 м), возможно в этот год не было прорыва земляной плотины пруда. На следующий год линейный размыв вновь стал значительным, достигнув 1.5 м, что можно объяснить более высоким стоком талых вод и перетоком воды из пруда через плотину без ее размыва. Точно таким же образом изменялись и площадные приросты оврага, поэтому корреляционный анализ подтвердил очень высокую связь между ними ($r = 0.985$; $\eta = 0.976$; $\eta^2 = 0.953$). Практически не отличается от выше рассмотренного и график зависимости линейного прироста от объемного (рис. 4 (д)), что подтверждается и очень высокой корреляционной связью между ними ($r = 0.984$; $\eta = 0.976$; $\eta^2 = 0.953$). Учитывая полученные очень высокие показатели связи, нет сомнения и в наличии такой же тесной связи между площадными и объемными размывами за рассматриваемый период ($r = 0.999$).

В отличие от всех выше рассмотренных, водораздельный овраг № 6 имеет положительный тренд за последние 5 лет, в то время как в предыдущие 6 лет линейный и площадной приросты были минимальными. Максимальный линейный прирост (1.5 м) отмечался в 2000, 2004 и 2007 г., затем скорости снижались до минимума в 2009 и 2014 г., после отмечается тенденция возрастания скоростей до следующего максимума (1.2 м) в 2021 г. Связь между линейным и площадным приростом оврага за 2004–2021 гг. оказалась недостаточно тесной ($r = 0.348$; $\eta = 0.580$; $\eta^2 = 0.336$), что можно объяснить более активным ростом его отвершков. 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, соответственно, значительный площадной и объемный размывы. Асинхронность показателей отчетливо прослеживается только в 2014 и в меньшей степени в 2015 г. (рис. 3 (е)).

Корреляционный анализ показал, что связь между линейным и объемным приростом оврага слабая, как и в предыдущем случае ($r = 0.326$; $\eta = 0.603$; $\eta^2 = 0.363$). Анализ графиков свидетельствует (рис. 4 (е)), что площади и объемы размывов по годам изменяются почти тождественно, о чем указывает и очень высокий коэффициент корреляции между ними ($r = 0.993$).

Во всех вышеперечисленных случаях расчеты критериев Блекмана и Фишера показали отсутствие значимых криволинейных связей между рассматриваемыми показателями. Отсутствие связи для вершинного оврага с активно растущими отвершками можно объяснить только перераспределением стока по ширине днища балки, что может быть вызвано формированием новых ложбин стока, возникающих при неправильной обработке пахотных земель и появлением “межевых канав” и “напашей” между полями. Это подтверждают и полевые наблюдения. Часто сток концентрируется по углубленным колеям полевых дорог, прокладываемых сельскохозяйственной техникой осенью по переувлажненной почве.

В пределах исследуемой территории склоновый сток формируется в период весеннего снеготаяния и при выпадении интенсивных ливней в теплое время года. Исследованиями в 70–90-х годах прошлого века было установлено, что на большей части Русской равнины, включая и восточные регионы около 80% прироста оврагов происходит за счет весеннего снеготаяния и лишь около 20% составляет доля ливневого стока (Овражная..., 1990; Рысин, 1998; Бутаков и др., 2000; География..., 2006; Григорьев, Рысин, 2021). Совершенно другая картина отмечается в Восточной Сибири. По данным наблюдений Ю.В. Рыжова (2015) в Юго-Западном Прибайкалье с 1985 по 1995 г. выявлено, что 70% годового прироста оврагов приходится на летний период и только 30% — на весенний. Данные инструментальных наблюдений за линейным и площадным приро-

стом двух оврагов в Баргузинской котловине с 1985 по 2009 г. также показали их асинхронность, при этом в годы отсутствия линейного прироста обнаруживался существенный площадной прирост (2015 г.). По данным исследований других авторов более 80% годового линейного прироста оврагов в Забайкалье приходится на летне-осенний период (Базарова, 1986; Тармаев, 1992).

Мониторинг (1981–1996 гг.) за приростом вершин оврагов в восточной Румынии позволил оценить вклад талого и ливневого стока в 57 и 43% соответственно (Ionita, 2006). Для данного региона 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 со значительными изменениями в землепользовании (Ionita, 2006; Ionita et al., 2015). Непосредственные измерения линейного роста донных оврагов на Люблинской возвышенности в Польше в период 2003–2005 гг. выявили доминирование (86%) талого стока, как основной причины отступления вершин. Однако последующий анализ гидрометеорологических данных и предшествующих наблюдений показал, что на самом деле вклад в линейный прирост оврагов аномально интенсивных ливней значительно выше, чем талого стока (Rodzik et al., 2009). В Китае на холмисто-овражном районе Лессового плато был исследован 31 овраг на активной стадии для количественного описания морфологии и установления эмпирических уравнений для оценки объема оврага на основе длины и площади его поверхности с использованием 3D-лазерного сканирования. Полученные зависимости могут использоваться при оценке степени опасности территорий от овражной эрозии (Ximeng Xu et al., 2016). Результаты статистического анализа 724 оврагов в разных регионах мира показывают, что измеренные приросты вершин оврагов значительно коррелируют с площадью оврага и нормой дождливого дня (многолетний среднегодовой слой осадков, деленный на среднее количество дождливых дней). Другие факторы (например, землепользование или тип почвы) не показали существенной корреляции с наблюдаемыми показателями прироста вершин, что может быть связано с неопределенностями при точной количественной оценке этих факторов (Vanmaercke et al., 2016). Правда, по данным исследований 20 оврагов, созданных в различных почвенных условиях на сельскохозяйственных полях Наварры и Леона (Испания) и Сицилии (Италия), указывается на высокую роль и почвенного фактора (Paul Ollobarren et al., 2016).

Детальный анализ роли гидрометеорологических показателей за 1998–2016 гг. в линейном и площадном приросте вершин рассматриваемых

оврагов был приведен в нашей предыдущей статье (Григорьев, Рысин, 2016). Поскольку обнаружилась очень тесная корреляционная зависимость между площадным и объемным приростом оврагов, то отдельно анализировать влияние гидрометеорологических факторов на объемный прирост нет необходимости.

Учитывая, что в рассматриваемый период происходили как климатические изменения, связанные с потеплением климата, особенно повышение температуры воздуха в зимние месяцы, так и сокращения площади пашни (обрабатываемых посевных площадей), максимум которого пришелся на период 1990–2010 гг. (Акмаров и др., 2014), можно утверждать, что именно данные факторы сказались на общем уменьшении темпов прироста оврагов в последние годы.

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 надежно 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, поперечного сечения на разных участках, а также тальвегов исследуемых оврагов. С начала 2000-х годов на 5 активно растущих оврагах различного типа (2 приводораздельных (склоновых), придолинный, донный и вершинный) проводятся ежегодные измерения линейного, площадного и объемного прироста вершин, в 2013 г. к ним был добавлен еще и пойменный овраг техногенного происхождения. Для большинства исследуемых оврагов максимальные размывы наблюдались в 2001 г., когда линейные приросты достигали 21.8 м, а площадные варьировались в пределах — от 23.1 до 436.7 м², а объемные, соответственно — от 398 до 3068 м³, но были и исключения, когда линейные приросты имели максимум в 2011 г., что было отмечено для приводораздельного оврага № 1 и вершинного оврага № 4. Анализ результатов многолетнего изучения линейного, площадного и объемного прироста вершинной части различных типов оврагов показал, что в большинстве случаев проявляется отчетливая зависимость между рассматриваемыми показателями, что наиболее характерно для пойменного оврага № 5 с коротким (2013–2021 гг.) периодом наблюдения. Здесь связь линейного прироста с площадным ($r = 0.985$) и объемным ($r = 0.984$) размывами оказалась очень вы-

сокой. Достаточно высокой получилась связь линейного прироста с площадным ($r = 0.819$) и объемным размывами ($r = 0.792$) у донного одновершинного оврага № 2 на участке “Курегово”. Высокая положительная связь линейного прироста с площадным ($r = 0.792$) и объемным размывами ($r = 0.756$) отмечена у придолинного оврага № 3 на правом склоне долины реки Вятки (“Крымская Слудка”). Умеренная связь линейного прироста с площадным ($r = 0.629$) и объемным размывами ($r = 0.429$) оказалась у приводораздельного одновершинного оврага № 1 на ключевом участке “Вятское”. Очень слабая положительная связь линейного прироста с площадным ($r = 0.348$) и объемным размывами ($r = 0.326$) обнаружилась у приводораздельного оврага № 6, растущего тремя вершинами на участке “Кулюшево”. Не обнаружена связь линейного прироста как с площадным ($r = 0.280$), так и с объемным размывами ($r = 0.289$) только у вершинного оврага № 4 (“Варзи-Ятчи”), растущего в верховьях днища голоценовой балки тремя вершинами, что объясняется формированием новых ложбин стока, возникающих при неправильной обработке пахотных земель на водосборе и более интенсивным развитием его отвершков. Во всех случаях отмечаются плавное изменение по годам площадного и объемного приростов и достаточно резкое колебание величин линейного прироста вершин оврагов, независимо от типа и их морфометрических особенностей. Для всех рассматриваемых оврагов выявлена очень высокая связь между площадным и объемным приростом, что является очевидным. Асинхронность линейного, площадного и объемного приростов исследуемых оврагов не совпадает по годам и не всегда связана с гидрометеорологическими показателями. Здесь существенное влияние могут оказывать склоновые процессы, инициированные выходом верховодки или чаще грунтовых вод в днище оврага, а в некоторых случаях и суффозия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации “Русское географическое общество” (Договор № 31/2020-Р).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акмаров П.Б., Князева О.П., Рысин И.И. Агроклиматический потенциал эффективности земледелия // Вестник Удмуртского ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. Вып. 2. 2014. С. 89–96.
- Атлас Удмуртской Республики / Под ред. И.И. Рысина. М.: Феория, 2016. 282 с.
- Базарова Л.Д. Эрозионные формы рельефа Чикойской впадины // Геология, палеовулканология и рельеф Забайкалья. Улан-Удэ: БФ СО АН СССР, 1986. С. 153–162.

Болысов С.И., Тарзаева Н.В. Метеорологический фактор в развитии регрессивной эрозии на юго-западе Подмосковья // Геоморфология. 1996. № 4. С. 97–103.

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.

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. Вып. 14. Науч. ред. Р.С. Чалов. М.: Изд-во МГУ, 2003. С. 76–92.

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 // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 5. С. 61–71.

Гафуров А.М., Усманов Б.М. Оценка интенсивности и динамики почвенной эрозии методом наземного лазерного сканирования // Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых учебных университетов). 2016. С. 81–90.

География овражной эрозии / Е.Ф. Зорина. М.: Изд-во МГУ, 2006. 324 с.

Григорьев И.И. Использование программного комплекса “Credo” для определения объемов и площадей оврагов // Вестник Удмуртского университета. Серия “Биология. Науки о Земле”. 2009. Вып. 2. С. 141–145.

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.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Исследования техногенных и сельскохозяйственных оврагов в Удмуртии // Вестник Удмуртского университета. Серия “Биология. Науки о Земле”. 2006. Вып. 2. С. 83–91.

Григорьев И.И., Рысин И.И. Оценка линейного и площадного прироста оврагов с применением инструментальных методов (на примере Удмуртии) // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 3. С. 64–78. <https://doi.org/10.31857/S0435428121030044>

Григорьев И.И., Рысин И.И. Техногенные овраги на территории Удмуртии. Казань: Изд-во Удмурт. ун-та; Изд-во АН РТ, 2017. 190 с.

Гусаров А.В., Рысин И.И., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н. Оценка современного тренда эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распаханном водосборе с использованием цезия-137 в качестве хрономаркера (юг Удмуртской Республики) // Геоморфология. 2019. № 2. С. 37–56. <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019237-56>

Дедков А.П., Рысин И.И., Чернышева Т.Н. Овражная эрозия на пахотных землях Европы // Геоморфология. 1993. № 2. С. 3–13.

- Зорина Е.Ф., Никольская И.И., Ковалев С.Н. Методика определения интенсивности роста оврагов // Геоморфология. 1993. № 3. С. 66–75.
- Коротина Н.М. Скорость роста оврагов в Ульяновском Поволжье // Геоморфология. 1981. № 4. С. 78–83.
- Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
- Назаров Н.Н. Овражная эрозия в Прикамье. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 104 с.
- Овражная эрозия востока Русской равнины / Под ред. А.П. Дедкова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1990. 144 с.
- Переведенцев Ю.А., Шумихина А.В., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В. Опасные гидрометеорологические явления на территории Приволжского федерального округа // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 20–30.
- Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В., Аухадеев Т.Р. Климатические изменения в Приволжском федеральном округе в XIX–XXI веках // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 36–46.
- Рыжов Ю.В. Овражная эрозия в межгорных котловинах Юго-Западного Прибайкалья // Геоморфология. 1998. № 3. С. 68–73.
- Рыжов Ю.В. Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: ГЕО, 2015. 180 с.
- Рысин И.И. О современном тренде овражной эрозии в Удмуртии // Геоморфология. 1998а. № 3. С. 92–101.
- Рысин И.И. Овражная эрозия в Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 1998. 274 с.
- Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Зайцева М.Ю. Влияние изменений климата на динамику темпов роста оврагов Вятско-Камского междуречья // Геоморфология. 2017. № 1. С. 90–103. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-90-103>
- 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.
- 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. 2017а. № 1. С. 63–72.
- Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 416 с.
- Сатдаров А.З. Методы исследования регрессивного роста оврагов: достоинства и недостатки // Уч. записки Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2016. № 158 (2). С. 277–292.
- Сельское хозяйство Удмуртской Республики. Ижевск: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по УР, 2019. 122 с.
- Тармаев В.А. Интенсивность образования линейной эрозии в бассейне р. Куналейки (Забайкалье) // География и природные ресурсы. 1992. № 1. С. 98–102.
- Caraballo-Arias N.A. Morphometric and hydraulic geometry assessment of a gully in SW Spain / N.A. Caraballo-Arias, C. Conoscenti, C. Di Stefano, V. Ferro, and A. Gymez-Gutierrez // Geomorphology. 2016. No. 274. P. 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.021>
- 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 // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. No. 16. 369 p. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030369>
- 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 modeling // Catena. 2015. Vol. 127. P. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.016>
- Ionita I. Gully development in eastern Romania: a case study from Falcu Hills // Natural Hazards. 2015. No. 79 (1). P. 113–138. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1732-8>
- Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // Catena. 2006. Vol. 68. P. 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.008>
- Khoboso E.S., Heinz R.B., Timothy D., and Mbulisi S. 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. Vol. 31. Iss. 2. P. 225–239. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1047412>
- Kociuba W., Janicki G., Rodzik J., and Stepniowski K. Comparison of volumetric and remote sensing methods (TLS) for assessing the development of a permanent forested loess gully // Natural Hazards. 2015. No. 79. P. 139–158. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1807-6>
- 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. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1246775>
- 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.
- Ollobarren P., Giménez R., Campo-Bescós M.A., and Casali J. Soil factors controlling gully erosion: an experimental approach // Submitted Abstracts 7th International Symposium on Gully Erosion 23–27 may 2016. West Lafayette, USA. P. 20.
- Rafaello 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. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.014>
- Rishikeshan C.A., Katiyar S.K., and Mahesh V.N.V. Detailed Evaluation of DEM Interpolation Methods in GIS Using DGPS Data // 2014 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. 2014. P. 666–671. <https://doi.org/10.1109/CICN.2014.148>
- Rodzik J., Furtak T., and Zglobicki W. The impact of snow-melt 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.
<https://doi.org/10.1002/esp.1882>
- 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. Vol. 367. P. 59–65.
<https://doi.org/10.5194/piahs-367-59-2015>
- 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., Nysen 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.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
- Ximeng Xu, Fenli Zheng, Chao Qin, and Hongyan Wu. Active stage gully morphological characteristics in the Loess Hilly-gully Region based on 3D laser scanning technique // Submitted Abstracts 7th International Symposium on Gully Erosion 23–27 may 2016. West Lafayette, USA. P. 24–25.

LONG-TERM DYNAMICS OF LINEAR, AREAL AND VOLUMETRIC GROWTH OF RAVINES ON THE TERRITORY OF UDMURTIA

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

^aUdmurt State University, Izhevsk, Russia

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

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

The Instrumental methods of studying linear, areal and volumetric growth of ravines on agricultural lands over the period from the early 2000s to 2021 are considered. The objects of the study include 6 ravines of various types (two the near-drainage divide, near-valley, top, bottom and floodplain), developing within 6 key areas, where their catchment areas are occupied mainly by plowed agricultural land. The purpose of the research is to identify the relationship between the linear, areal, and volumetric growth of ravines to their morphological and morphometric characteristics. The research methods included a geodetic survey of the top part of the ravines, their edges, talwegs and transverse profiles using an electronic tachometer.

For most of the considered ravines, the maximum washouts were observed in 2001, when the linear headward retreat, areal, and volumetric varied within 13.8–21.8 m, (arithmetic average for the entire observation period was 0.68–3.45 m), from 25.1 to 436.7 m², (arithmetic mean – 11.12–109.02 m²), and from 398 to 3068 m³, (arithmetic mean – 27.52–889.80 m³), respectively. There were exceptions when linear increments had a maximum in 2011, for example, the near-drainage divide ravine No. 1 (2.3 m) and the top ravine No. 4 (3.25 m). For all types of ravines, the main statistical indicators of the values of linear, area and volume increments for the study period were calculated.

It was found that in most cases there is a clear dependence between the considered indicators, which is most typical for a floodplain ravine with a short (2013–2021) observation period. Here, the relationship of linear growth with area ($r = 0.985$) and volume ($r = 0.984$) washouts turned out to be very high. The relationship of linear growth with areal ($r = 0.819$) and volumetric washouts ($r = 0.792$) at the bottom of a single-top gully on the “Kuregovo” site turned out to be quite high. A high positive relationship of linear growth with areal ($r = 0.792$) and volumetric erosion ($r = 0.756$) was noted at the near-valley gully on the right slope of the valley of the Vyatka River (“Crimean Sludka”).

A moderate relationship between the linear growth and the areal ($r = 0.629$) and volumetric washouts ($r = 0.429$) was found for single-top near-drainage divide ravine in the key area “Vyatskoye”. A very weak positive relationship between linear growth and areal ($r = 0.348$) and volumetric washouts ($r = 0.326$) was found for the near-drainage divide gully growing with three headcuts in the Kulyushevo area. No relationship was found between linear growth with both areal ($r = 0.280$) and volumetric erosion ($r = 0.289$) only for the top ravine (“Varzi-Yatchi”), growing in the upper reaches on the bottom of the Holocene gulch. This ravine has with three headcuts expanding in three directions because of the emergence of new runoff troughs due to agricultural activity.

For all of the considered ravines, a very high correlation was found between the area and volume growth ($r = 0.969 \pm 0.074$). The asynchrony of the linear, area and volume increments of the studied ravines is not always associated with climate factors, which can be explained by the influence of slope processes, and in some cases by suffusion. A smooth change over the years of areal and volumetric erosion and a rather sharp fluctuation in the values of the linear growth in the headcuts of ravines, regardless of the type and their morphological and morphometric features, were revealed.

Keywords: growth of ravines, morphometry of ravines, instrumental survey, long-term monitoring, statistical and correlation analysis

ACKNOWLEDGEMENTS

The reported study was funded by the All-Russian public organization "Russian Geographical Society" (Agreement No. 31/2020-R).

REFERENCE

- Akmarov P.B., Knyazeva O.P., and Rysin I.I. Agroclimatic potential of agricultural efficiency. *Vestnik Udmurtskogo un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*. Iss. 2. 2014. P. 89–96. (in Russ.)
- Bazarova L.D. Erosive landforms of the Chikoy Depression. *Geologiya, paleovulkanologiya i relief Zabaikalya*. Ulan-Ude: CF SB AS USSR (Publ.), 1986. P. 153–162. (in Russ.)
- Bolysov S.I. and Tarzaeva N.V. Meteorological factor in the development of regressive erosion in the South-West of the Moscow region. *Geomorfologiya*. 1996. No. 4. P. 97–103. (in Russ.)
- Butakov G.P., Zorina E.F., Nikolskaya I.I., Rysin I.I., Serebrennikova I.A., and Yusupova V.V. Trends in the development of gully erosion in European Russia. *Eroziionnye i ruslovyie protsessy*. M.: Izd-vo MGU (Publ.), 2000. Iss. 3. P. 52–62. (in Russ.)
- Caraballo-Arias N.A. Morphometric and hydraulic geometry assessment of a gully in SW Spain. N.A. Caraballo-Arias, C. Conoscenti, C. Di Stefano, V. Ferro, and A. Gýmez-Gutierrez. *Geomorphology*. 2016. No. 274. P. 143–151.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.021>
- 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. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. No. 16. 369 p.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16030369>
- Dedkov A.P., Rysin I.I., and Chernysheva T.N. Gully erosion on arable lands of Europe. *Geomorfologiya*. 1993. No. 2. P. 3–13. (in Russ.)
- 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. Vol. 127. P. 92–101.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.016>
- Gafurov A.M. and Usmanov B.M. Evaluation of intensity and dynamics of soil erosion by method of terrestrial laser scanning. *Eroziionnye, ruslovyie i us'evye protsessy*. M.: MSU (Publ.), 2016. P. 81–90. (in Russ.)
- Gafurov A.M., Rysin I.I., Golosov V.N., Grigorev I.I., and Sharifullin A.G. Estimation of the modern growth of the ravine tops of the southern megasclone of the East European plain using a set of instrumental methods. *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2018. No. 5. P. 61–71. (in Russ.)
- Grigorev I.I. and Rysin I.I. Research of technogenic and agricultural ravines in Udmurtia. *Vestnik Udm. Un-ta. Ser. Biol. Nauki o Zemle*. 2006. Iss. 2. P. 83–91. (in Russ.)
- Grigorev I.I. and Rysin I.I. Assessment of linear and areal growth of ravines using instrumental methods (on the example of Udmurtia). *Geomorfologiya*. 2021. T. 52. No. 3. P. 64–78. (in Russ.)
<https://doi.org/10.31857/S0435428121030044>
- Grigorev I.I. and Rysin I.I. *Tekhnogennyye ovragi na territorii Udmurtii* (Technogenic ravines on the territory of Udmurtia). Kazan': Izd-vo Udmurt. Un-ta (Publ.), Izd-vo Akademii nauk RT (Publ.), 2017. 190 p. (in Russ.)
- Grigorev I.I. Using the software complex "Credo" to determine the volume and area of ravines. *Vestnik Udm. Un-ta. Ser. Biol. Nauki o Zemle*. 2009. Iss. 2. P. 141–145. (in Russ.)
- Grigorev I.I. Spatiotemporal analysis of growth rates of technogenic ravines on the territory of Udmurtia. *Eroziya pochv, ovrazhnaya erozia, ruslovyie protsessy: teoreticheskie i prikladnye voprosy*. M.: MSU (Publ.), 2011. P. 90–99. (in Russ.)
- Gusarov A.V., Rysin I.I., Sharifullin A.G., and Golosov V.N. Assessment of the current trend of erosion-accumulative processes in a small ploughed watershed using caesium-137 as a chronomarker (South of the Udmurt Republic). *Geomorfologiya*. 2019. No. 2. P. 37–56. (in Russ.)
- Ionita I. Gully development in eastern Romania: a case study from Falcu Hills. I. Ionita, L. Niacsu, G. Petrovici, A.M. Blebea-Apostu. *Natural Hazards*. 2015. No. 79 (1). P. 113–138.
<https://doi.org/10.1007/s11069-015-1732-8>
- Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *Catena*. 2006. Vol. 68. P. 133–140.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.008>
- Khoboso E.S., Heinz R.B., Timothy D., and Mbulisi S. 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. Vol. 31. Iss. 2. P. 225–239.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1047412>
- 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. 79. P. 139–158.
<https://doi.org/10.1007/s11069-015-1807-6>
- Korotina N.M. The growth rate of ravines in the Ulyanovsk Volga region. *Geomorfologiya*. 1981. No. 4. P. 78–83. (in Russ.)
- Lakin G.F. *Biometriya* (Biometrics). M.: Vysshaya shkola (Publ.), 1990. 352 p. (in Russ.)
- 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.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1246775>
- 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.
<https://doi.org/10.1002/esp.2172>

- 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.)
- Ollobarren P., Giménez R., Campo-Bescós M.A., and Casali J. Soil factors controlling gully erosion: an experimental approach. *Submitted Abstracts 7th International Symposium on Gully Erosion 23-27 may 2016, West Lafayette, USA*. P. 20.
- Perevedencev Yu.A., Shumihina A.V., Shantalinskij K.M., and Guryanov V.V. Dangerous hydrometeorological phenomena on the territory of the Volga Federal District. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2019. No. 12. P. 20–30. (in Russ.)
- Perevedencev Yu.P., Sherstyukov B.G., Shantalinskij K.M., Guryanov V.V., and Auhadeev T.R. Climatic changes in the Volga Federal District in the XIX–XXI centuries. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020. No. 6. P. 36–46. (in Russ.)
- Rafaello 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.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.014>
- 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.
<https://doi.org/10.1109/CICN.2014.148>
- Rodzic J., Furtak T., and Zglobicki W. The impact of snow-melt 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.
<https://doi.org/10.1002/esp.1882>
- Rychagov G.I. *Obshchaya geomorfologiya* (General geomorphology). M.: MSU (Publ.), 2006. 416 p. (in Russ.)
- Rysin I.I. About the current trend of gully erosion in Udmurtia. *Geomorfologiya*. 1998. No. 3. P. 92–101. (in Russ.)
- Rysin I.I. *Ovrazhnaya eroziya v Udmurtii* (Gully erosion in Udmurtia). Izhevsk: UdSU (Publ.), 1998. 274 p. (in Russ.)
- Rysin I.I., Golosov V.N., Grigorev I.I., and Zajceva M.Yu. The influence of climate change on the dynamics of the growth rates of the ravines of the Vyatka-Kama interfluvium. *Geomorfologiya*. 2017. No. 1. P. 90–103. (in Russ.)
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-90-103>
- Rysin I.I., Grigorev I.I., and Zaitseva M.Yu. Results of research of gully erosion in Udmurtia for the last two decades. *Nauka Udmurtii*. 2015. No. 3 (73). P. 150–164. (in Russ.)
- Rysin I.I. (Ed). *Atlas Udmurtskoi Respubliki* (Atlas of the Udmurt Republic). M.: Feoriya (Publ.), 2016. 282 p. (in Russ.)
- Rysin I.I., Grigorev I.I., Zaitseva M.Yu., and Golosov V.N. Dynamics of the linear retreat of gully heads within the Vyatka-Kama interfluvium at the turn of 20th century. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geogr.* 2017. No. 1. P. 63–72. (in Russ.)
- Ryzhov Yu.V. *Formirovanie ovragov na yuge Vostochnoi Sibiri* (Formation of ravines in the south of Eastern Siberia). Novosibirsk: GEO (Publ.), 2015. 180 p. (in Russ.)
- Ryzhov Yu.V. Gully erosion in the intermountain basins of the Southwestern Baikal Region. *Geomorfologiya*. 1998. No. 3. P. 68–73. (in Russ.)
- Satdarov A.Z. 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.)
- Sel'skoe khozyaistvo Udmurtskoi Respubliki* (Agriculture of the Udmurt Republic. Izhevsk: Territorialnyi organ Federalnoi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po UR (Territorial body of the Federal State Statistics Service for UR), 2019. 122 p. (in Russ.)
- Tarmaev V.A. 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.)
- 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. Vol. 367. P. 59–65.
<https://doi.org/10.5194/piahs-367-59-2015>
- Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Bezerra J.F.R., Bolysov S., Dvinskih 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., Yermolaev O. How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*. 2016. No. 154. P. 336–355.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
- Veretennikova M.V., Zorina E.F., Kovalev S.N., and Lyubimov B.P. 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 ruslovyie protsessy*. Iss. 14. Nauchnyi red. R.S. Chalov. M.: Izd-vo MGU (Publ.), 2003. P. 76–92. (in Russ.)
- Ximeng Xu, Fenli Zheng, Chao Qin, and Hongyan Wu. Active stage gully morphological characteristics in the Loess Hilly-gully Region based on 3D laser scanning technique. *Submitted Abstracts 7th International Symposium on Gully Erosion 23-27 may 2016, West Lafayette, USA*. 2016. P. 24–25.
- Zorina E.F., Nikolskaya I.I., and Kovalev S.N. Method for determining the intensity of growth of ravines. *Geomorfologiya*. 1993. No. 3. P. 66–75. (in Russ.)