

УДК 551.435.162(470.51)

**АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНОГО,
ПЛОЩАДНОГО И ОБЪЕМНОГО ПРИРОСТА ОВРАГОВ НА
ТЕРРИТОРИИ УДМУРТИИ**

Поступила в редакцию: 08.04.2022

Введение

Овражная эрозия является одним из наиболее опасных природно-техногенных рельефообразующих процессов, наносящих большой ущерб земледелию и окружающему ландшафту. Овраги осуществляют размыв, транзит и аккумуляцию отложений с их водосборов, образуют отрицательные линейные формы, способствуют поступлению продуктов смыва в русла временных и постоянных водотоков и вызывают заиление рек и водохранилищ [1, 2]. Овражная эрозия вызывает также сокращение площадей пахотных земель, разрушение строений, коммуникаций и т.п. К основным причинам развития оврагов относятся нерациональное землепользование [3] и все возрастающая техногенная нагрузка на окружающую среду (строительство дорог и трубопроводов, уничтожение естественной растительности, неконтролируемый сброс воды и т.п.) [4, 5, 6].

Основным методом оценки активности роста оврагов является метод линейных измерений, который среди всех анализируемых является наиболее простым и наименее затратным. В основу метода 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 [7, 8, 9, 10].

В полевых условиях обычно используется два метода: визуальный и инструментальный. К визуальным методам относятся рекогносцировочные работы и качественная оценка изменений на исследуемых участках [11]. Современные полевые инструментальные методы позволяют с высокой точно-

стью оценивать изменения параметров оврагов (изменение длины, глубины, площади, объема и т. п.). Использование линейных измерений долгое время оставалось основным и наиболее точным способом оценки роста оврагов [12–14]. Данный метод, с помощью которого можно получить относительно точные данные о линейном приросте вершины оврага, даже при использовании нескольких реперов не позволяет с достаточной точностью оценить площадной и объемный прирост вершин оврагов. 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 года. 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 наблюдений количество наблюдаемых вершин оврагов составляло 120 [1]. В дальнейшем появившиеся на участках наблюдений новые овраги и активно растущие отвершки оврагов, также были включены в сеть наблюдений [15]. Одновременно расширение сети мониторинга происходило за счёт 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).

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

59 объемного прироста за многолетний период наиболее активно растущих ов-
60 рагов, полученных с применением инструментальных методов.

61 **Объекты исследования**

62 В пределах территории УР распространены ландшафты южной тайги и
63 подтаежной зоны, сильно преобразованные хозяйственной деятельностью.
64 Междуречные пространства сложены лёссовидными делювиально-
65 солифлюкционными суглинками, тогда как в днищах балок, прорезаемых
66 донными оврагами, накапливаются тяжелосуглинистые отложения, смытые с
67 приводораздельных склонов. Ряд придолинных и приводораздельных овра-
68 гов формируются в верхнепермских глинах, иногда с прослоями более проч-
69 ных пород (известняков, аргиллитов, песчаников и т.п.) [16].

70 Для территории Удмуртии характерен умеренно теплый и влажный
71 климат с продолжительной зимой и относительно коротким летом. Средне-
72 годовая температура изменяется от $+2.3^{\circ}\text{C}$ на севере, до $+3.5^{\circ}\text{C}$ на юге. Сред-
73 ние температуры января и июля варьируют в пределах $-13.3 - -11.9^{\circ}\text{C}$, и
74 $+18.3 - +19.7^{\circ}\text{C}$, соответственно, с выраженным трендом повышения зимних
75 температур воздуха в зимние месяцы [17, 18]. Устойчивый снежный покров
76 держится 155–175 дней. Среднегодовая сумма осадков составляет 500–650
77 мм [19]. В связи с теплыми зимами уменьшается и глубина промерзания
78 почв. Результаты анализа по 8 метеостанциям УР за 1973-2018 гг. показали
79 положительный тренд опасных гидрометеорологических явлений (смерчи,
80 сильные ливни и др.) [18].

81 Если в 1955 г. площадь пашни в УР была максимальной, то за после-
82 дующие 35 лет (1955–1990 гг.) сокращение составило менее 3%, а после 1990
83 г. темпы сокращения обрабатываемых пахотных угодий (посевных площа-
84 дей) увеличились и в интервале 1990–2010 гг. площадь их уменьшилась поч-
85 ти на четверть, составив 76.5% по отношению к 1990 г. При этом за послед-
86 ние 30 лет посевы зерновых культур во всех категориях хозяйств республики
87 сократились с 739 тыс. га до 406 тыс. га и соответственно возросла площадь

кормовых культур до 613 тыс. га [20]. По данным статистического сборника в 2018 году площадь посевных площадей во всех категориях хозяйств УР вновь уменьшилась и составила 86,6 % по отношению к 2005 г. Площади под кормовыми культурами остались практически на прежнем уровне [21].

Начиная с 2000-х годов на ряде активно растущих оврагов нами проводятся ежегодные измерения линейного, площадного и объемного прироста их вершинной части (рис. 1). Выбор исследуемых 6 оврагов обусловлен их активным ежегодным линейным, площадным и объемным приростом. На большинстве же других оврагов, где также использовалась тахеометрическая съемка их вершинных участков, с 2008-2010 годов прирост по разным причинам прекратился или находился близко к нулевым значениям. Поэтому продолжать детальную съемку на них не было необходимости и возможности.

Морфометрические характеристики и координаты вершин шести активно растущих оврагов, где осуществлялась тахеометрическая съемка, представлены в табличной форме в предыдущей статье [16]. 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. Северянка. Суммарный прирост вершины оврага за 2000-2021 гг. составил 20.5 м, а за предыдущий период наблюдений (1978-1999 гг.) он вырос на 28.9 м. Максимальный годовой линейный прирост за весь период наблюдений был зарегистрирован в 1991 г и составил 2.9 м. Овраг растет одной языковидной вершиной (рис. 2а), глубина вершинного уступа в 2021 г. немного уменьшилась по сравнению с 2017 г. [16] и составила 2.4 м, аналогично уменьшилась и ширина при вершине – 7.4 м.

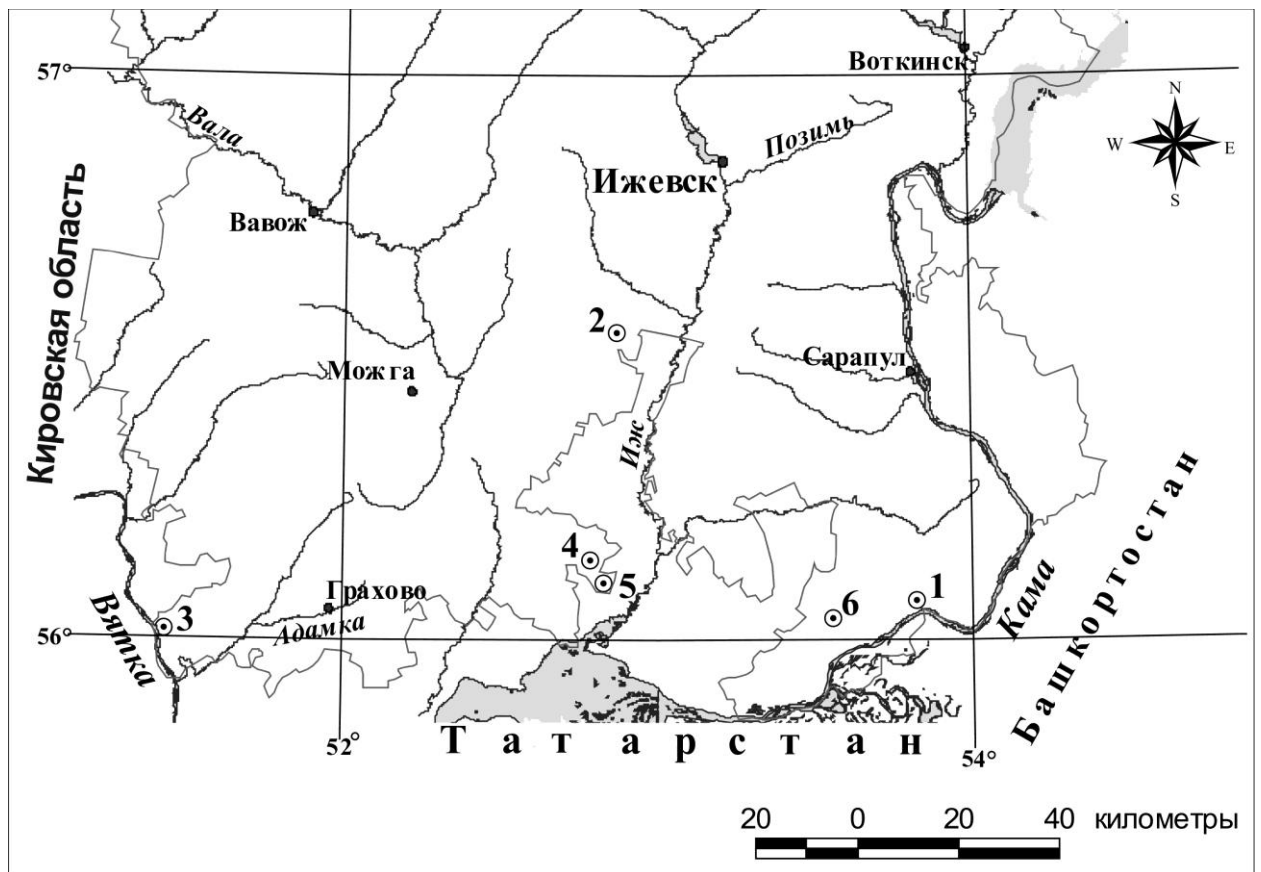


Рисунок 1 - Расположение ключевых участков по мониторингу линейного, площадного и объемного размывов различных типов оврагов в пределах территории Удмуртской Республики.

Цифрами обозначены номера оврагов и ключевых участков

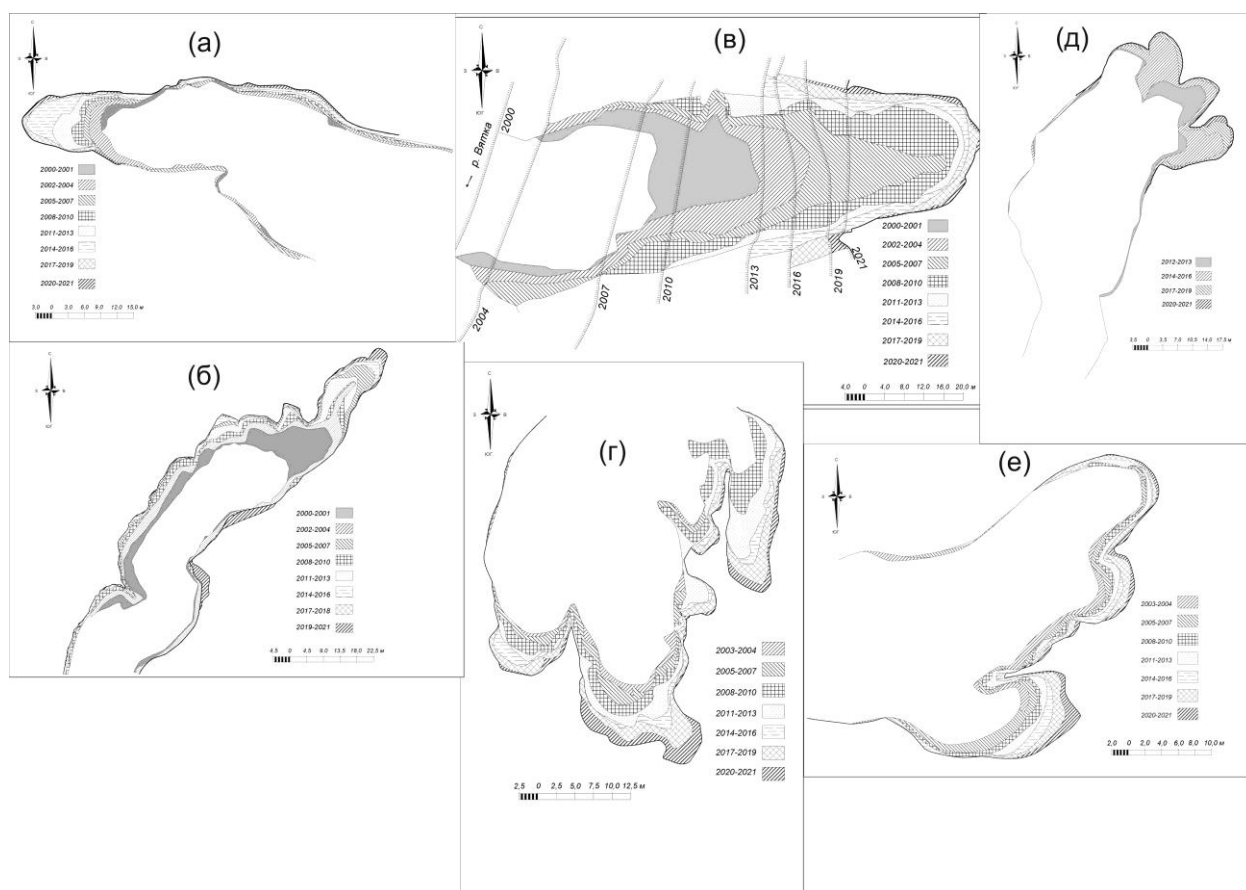


Рисунок 2 - Схемы линейного и площадного приростов верховьев оврагов: а – овраг № 1 (2000-2021 годы), б – овраг № 2 (2000-2021 годы), в – овраг № 3 (2000-2021 годы), г – овраг № 4 (2003-2021 гг.), д – овраг № 5 (2012-2021 гг.), е – овраг № 6 (2003-21 гг.)

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 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 1:25 000), размах высот рельефа — 76 м [22]. Овраг имеет одну вершину (рис. 26) и размывает балочный аллювий суглинистого механического состава. Суммарный прирост вершины оврага за период тахеометрической съемки (2000 - 2021 гг.) составил 51.6 м, что немного меньше, чем за предыдущий (1978 – 1999 гг) период наблюдений (56.6 м), когда максимальный линейный прирост в 1991 г. составил 4.7 м. Глубина 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 [16]. За последние 5 лет глубина и ширина оврага при вершине постепенно уменьшаются.

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 оврагами, но и руслом реки (рис. 2в). Если длина оврага в 2004 г. составляла около 60 м, в настоящее время в результате размыва рекой берегового уступа его длина сократилась до 27 м. Максимальная величина руслового размыва на этом участке за 2000 – 2021 годы составила более 70 м, а суммарный прирост оврага составил 65.8 м. Овраг имеет одну вершину, ширина его при вершине 9.2 м, глубина вершинного уступа уменьшилась до 1.8 м.

Вершинный 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 (195 га) и на протяжении длительного времени имел 2 вершины, а с 2008 года появилась

третья, которая достаточно активно развивается в последние годы (рис. 2г). Суммарный прирост вершины оврага за последние 22 года наблюдений составил 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 в 2021 году составила 12.5 м, а глубина вершинного уступа – 1.4 м, по сравнению с 2017 г. ширина немного увеличилась, а глубина уменьшилась [16].

Пойменный овраг № 5 расположен в 500 м к С-В от юго-восточной окраины д. Юмьяшур Алнашского района. Овраг возник на относительно широкой левобережной пойме р. Варзинка (150 – 300 м) вследствие прорывов искусственно созданной земляной запруды в устье балки 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 уровень русла реки, где возник овраг, составляет 70 м, превышение вершины оврага относительно его устья - 8 м. Таким образом, глубина местного базиса эрозии здесь составляет 92.6 м. Суммарный линейный прирост оврага за 2008 – 2021 годы составил 96 м, а в первый год прорыва земляной запруды в 2007 году он вырос на 53 м. Второй максимум прироста был зарегистрирован на следующий 2008 г. (38 м), что было связано с повторным прорывом дамбы. Общая длина оврага составляет 149 м. До 2011 г. овраг активно рос одной вершиной, в 2012 г. появилась 2-я вершина, а с 2013 г. прирост осуществляется 3-мя вершинами (рис. 2д). Максимальная глубина оврага при вершине в 2021 г. составила 2.3 м, а ее ширина в 3-х м от вершины – 7.8 м. Глубина оврага в последние годы уменьшается, а ширина, наоборот – возрастает.

Приводораздельный овраг № 6 расположен в 1250 м на СВ от центра с. Кулюшево Каракулинского района. Овраг первоначально возник на крутом левом склоне долины р. Кобылка (правый приток р. Кама), в последние годы вершина размывает плотный глинистый элювий коренных пород в средней

184 части склона приводораздельной поверхности. Поэтому суммарный линей-
185 ный прирост вершины оврага за 2000 – 2021 гг. составил всего 15 м. За пери-
186 од же с 1978 по 1999 гг. овраг вырос на 18.3 м. Овраг растет тремя вершина-
187 ми (рис. 2е). Глубина вершинного уступа в 2021 году составляла 1.3 м, ши-
188 рина оврага при вершине, соответственно 7.6 м. Глубина вершинного уступа
189 за последние 5 лет практически не изменилась, а ширина немного увеличи-
190 лась [16].

191 Второй приводораздельный овраг на этом же ключевом участке мы ис-
192 ключили из анализа, поскольку он имеет техногенное происхождение и воз-
193 ник в результате залповых выпусков вод с площадок добычи нефти через во-
194 допропускную трубу, проложенную через дорожную насыпь и его развитие
195 полностью контролировалось хозяйственной деятельностью [16]. На данном
196 овраге велись преимущественно наблюдения за линейным и площадным
197 приростом вершины, при этом за последние 5 лет прирост вершины оврага
198 был близок к нулевым значениям или отсутствовал.

199 Водосборные площади практически всех наблюдаемых оврагов пред-
200 ставлены обрабатываемыми пахотными угодьями, при этом вершины пер-
201 вичных оврагов практически вплотную подходят к пашне. Балочные водо-
202 сборы вторичных оврагов (пойменный, донный и вершинный) также обраба-
203 тываются, где выращиваются зерновые (озимая рожь и овес) и зернобобовые
204 культуры с чередованием кормовых и технических культур.

205 Методика исследований

206 Для более детального изучения динамики развития оврагов использу-
207 ется геодезическая съемка с помощью электронного тахеометра [22, 23] и
208 съемка с помощью наземного лазерного 3D сканера [24]. Использование на-
209 земного лазерного 3D-сканера позволяет достигать точности до долей мил-
210 лиметра [25] и создавать трехмерную модель изучаемого объекта. Но при
211 этом не стоит забывать о высокой стоимости лазерных 3D-сканеров, что яв-
212 ляется основной причиной, сдерживающей их массовое применение.

Выбор методов для оценки скорости роста оврагов зависит еще от периода времени, для которого проводятся исследования и требуемой точности конечных оценок. Обычно выделяются короткий (1–10 лет) [26, 27] и длинный (более 10 лет) временные интервалы наблюдений [28, 29]. В первом случае чаще применяют следующие методы: измерение линейного прироста вершины оврага методом реперов [22] и с помощью беспилотных летательных аппаратов [30], измерения объемов с использованием наземного лазерного сканирования [31, 32], фотограмметрии и повторных DGPS измерений (для создания цифровой модели рельефа) [30, 33, 34]. Точные методы используются обычно при исследовании механизма процессов или когда требуется максимально повысить точность значений площадного или объемного приростов.

Топографо-геодезические работы, проводимые при изучении регрессивного роста оврагов, заключаются в высокоточной 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 года начали применяться лазерные электронные тахеометры “Trimble 3305”, затем “Nicon NPR-332”.

Для всех рассматриваемых 6 оврагов вначале были рассчитаны корреляционные связи между ежегодными линейными, площадными и объемными величинами их прироста на каждом из ключевых участках. На втором этапе были установлены корреляционные связи между величинами прироста оврагов и гидрометеорологическими факторами за период с 2000 по 2017 гг. [16].

Поскольку не всегда рассматриваемые зависимости являются прямолинейными, то, наряду с обычным коэффициентом корреляции (r), были вы-

числены 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 [35].

Результаты и обсуждения

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. Статистический анализ данных 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 более плавное изменение площадного прироста, в отличие от линейного, для последнего характерна более резкая амплитуда изменения величин по годам. Асинхронными являются изменения рассматриваемых показателей в 2003, 2006, 2013 и 2021 годах (рис. 3а).

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. 4а). При анализе графиков видно, что асинхронными были изменения соответствующих показателей в 2003, 2006, 2011, 2013 и 2021 годах. В отличие от линейного и площадного приростов, объем размыва в 2011 году 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, очевидной является 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 объемного размывов может быть обусловлена чередованием преобладания

процессов бокового или глубинного размывов, что не всегда бывает синхронным, а иногда отмечается их асинхронность.

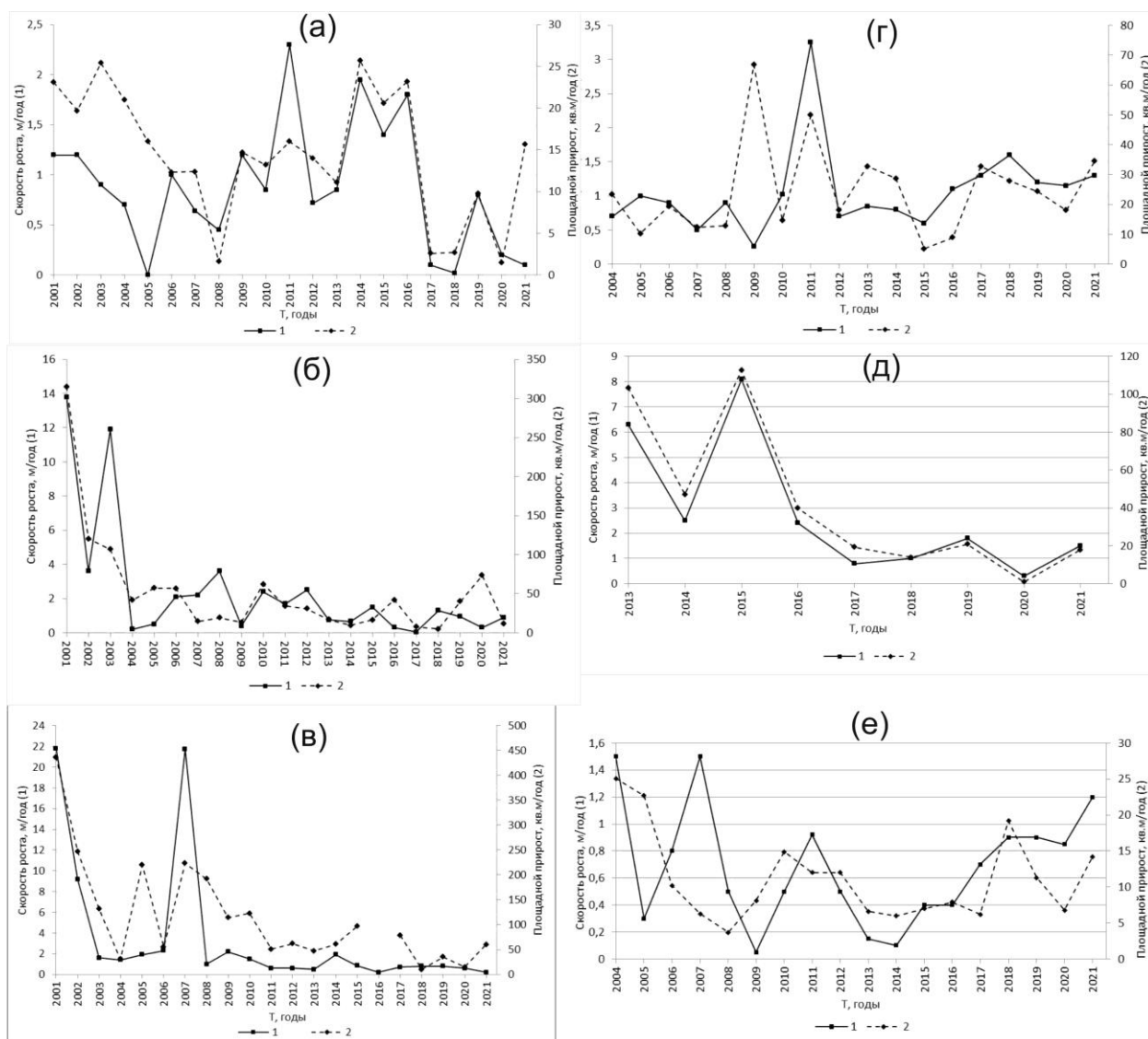


Рисунок 3 - Графики изменения линейного (1) и площадного (2) прироста вершинной части оврагов: а – овраг № 1 (2001-2021 гг.), б – овраг № 2 (2001-2021 гг.), в – овраг № 3 (2001-2021 гг.), г – овраг № 4 (2004-2021 гг.), д – овраг № 5 (2013-2021 гг.), е – овраг № 6 (2004-2021 гг.)

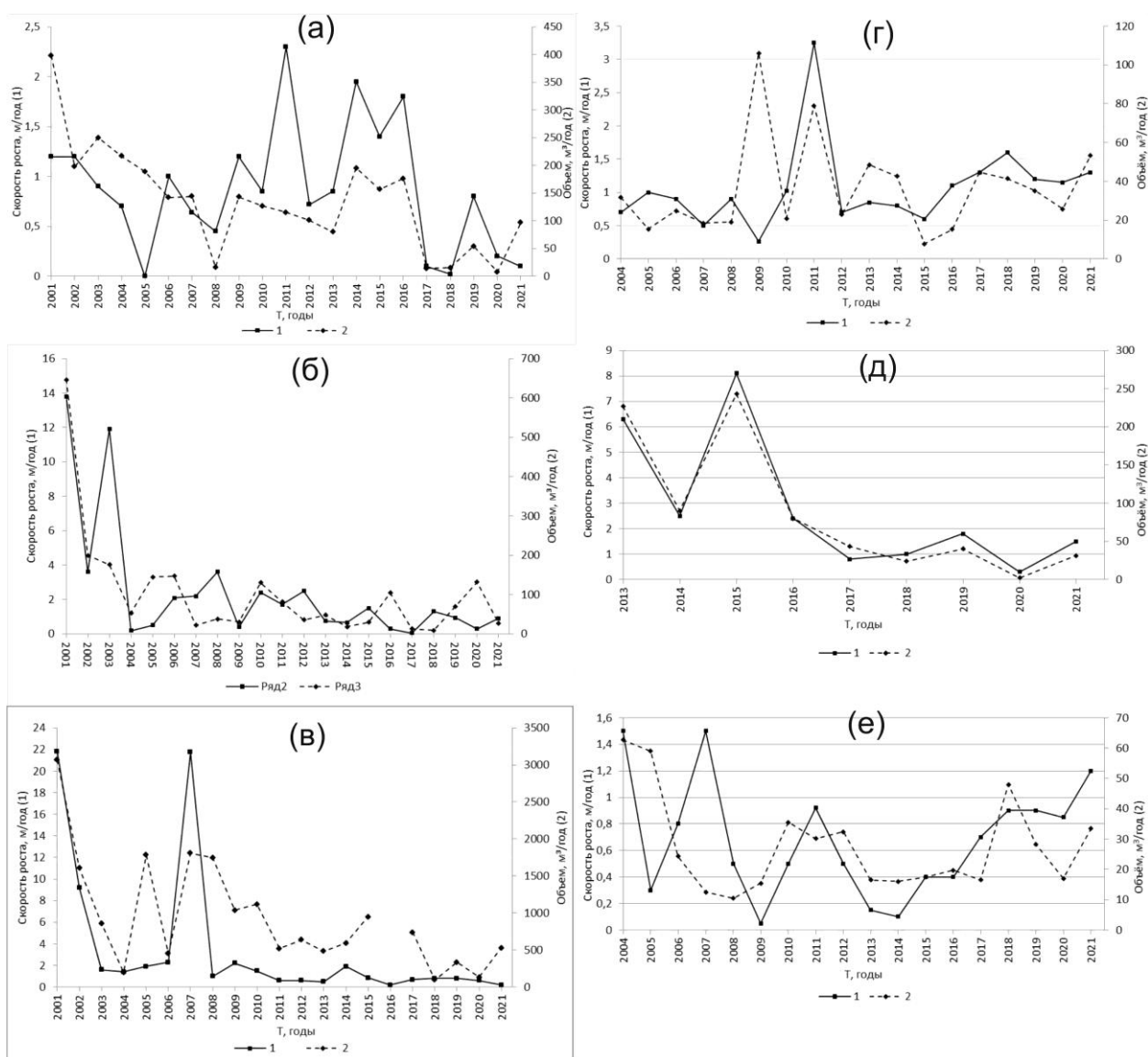


Рисунок 4 - Графики изменения линейного (1) и объемного (2) прироста вершинной части оврагов: а – овраг № 1 (2001-2021 гг.), б – овраг № 2 (2001-2021 гг.), в – овраг № 3 (2001-2021 гг.), г – овраг № 4 (2004-2021 гг.), д – овраг № 5 (2013-2021 гг.), е – овраг № 6 (2004-2021 гг.)

Линейный и площадной приросты вершинной части донного оврага № 2 за рассматриваемый период имеют общую тенденцию к затуханию (рис. 36). Максимальный прирост отступления вершины оврага был отмечен в 2001 году 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. 26).

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 гг. имел аномально высокие (в 3–6 раз выше, чем в предшествующие и последующие годы) темпы прироста вершины, 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 им. М.В. Ломоносова при стационарных наблюдениях с 1985 по 1999 годы [36]. 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 году, когда был отмечен минимальный линейный прирост (0.2 м), а площадной прирост был существенным (41.8 м²). Аналогичная ситуация была отмечена в 2020 году, 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. 36). 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 одновёршинных оврагов.

Аналогичная картина наблюдается при сопоставлении линейного и объемного прироста оврага (рис. 46). Максимальные объемы размыва отмечены в годы с наибольшим линейным приростом, исключением, как и в предыдущем случае, являются 2004 и 2020 годы, когда при минимальных линейных приростах были зафиксированы достаточно высокие значения объ-

емного 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 году, 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 году, хотя площадной прирост был в 2 раза меньше максимального. Существенное сокращение линейного прироста оврага наблюдается с 2011 года, 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 р. Вятка в период половодья. На графике отчетливо прослеживается синхронность между значениями линейного и площадного прироста, исключениями являются лишь 2006, 2009, 2015 и 2021 годы. 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 гг., а минимальные – в 2018 и 2020 гг (рис. 4в). 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. 3г). Здесь, в отличие от предыдущих оврагов, максимальный линейный прирост был зарегистрирован в 2011 году (3.3 м), а наибольший прирост площади был в 2009 году, но и в 2000 и 2001 годах линейные приросты были существенными и чуть превышали 2 м. Как показывает график, вершинный овраг имеет тенденцию к активизации за 2015-2021 годы, при этом высокий прирост был отмечен в 2018 году (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 внутрипочвенного стока. Именно он в основном формирует временные водотоки, способствующие постепенному регрессивному отступанию вершин донных оврагов [37]. 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 [38].

Анализ графика показывает, что вариации линейного и площадного приростов вершинного оврага в 2005, 2006, 2009 и 2018 годах 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. 3г).

Выше рассмотренный график по внешнему виду практически не отличается от графика связи линейного и объемного прироста оврага (рис. 4г). Здесь также максимальный объем размыва был отмечен в 2009 году и связан с активным развитием отвершков в восточной части от основного оврага, при этом отмечалось 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. 3д) 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 гг. (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. 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. 4д), 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, приводораздельный овраг № 6 имеет положительный тренд за последние 5 лет, в то время как в предыдущие

6 лет линейный и площадной приросты были минимальными [16]. Максимальный линейный прирост (1.5 м) отмечался в 2000, 2004 и 2007 годах, затем скорости снижались до минимума в 2009 и 2014 годах, 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 годах (рис. 3е).

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. 4е), 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 но-

вых 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. 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 [1,2, 16, 39, 40]. Совершенно другая картина отмечается в Восточной Сибири. По данным наблюдений Ю.В. Рыжова [41] в Юго-Западном Прибайкалье с 1985 по 1995 гг. выявлено, что 70% годового прироста оврагов приходится на летний период и только 30% - на весенний. Данные инструментальных наблюдений за линейным и площадным приростом 2-х оврагов в Баргузинской котловине с 1985 по 2009 годы также показали их асинхронность, при этом в годы отсутствия линейного прироста обнаруживался существенный площадной прирост [41]. По данным исследований других авторов более 80% годового линейного прироста оврагов в Забайкалье приходится на летне-осенний период [42, 43].

Данные мониторинга (1981-1996 гг.) за приростом вершин оврагов в восточной Румынии позволили оценить вклад талого и ливневого стока в 57% и 43% соответственно [44]. При этом более 66% суммарного прироста вершин произошло за 4 года, которые характеризовались выпадением сильных ливней 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. Автор отмечает, что активизация овражной эрозии после 1960-х годов, наряду с гидрометеорологическими факторами, также связана со значительными изменениями в землепользовании [44, 45]. Непосредственные измерения стока воды и наносов и линейного роста донных оврагов на Люблинской возвышенности

в Польше в период 2003-2005 гг. выявил доминирование (86%) талого стока, как основной причины отступления 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 [46]. В Китае на холмисто-овражном районе Лессового плато были исследованы 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 будут использованы при оценке степени опасности от овражной эрозии [47]. 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 [48]. 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 [49].

Детальный анализ роли гидрометеорологических показателей за 1998 – 2016 годы в линейном и площадном приросте вершин рассматриваемых оврагов был приведен в нашей предыдущей статье [16]. 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. [20], 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 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, поперечного сечения на разных участках, а также тальвегов исследуемых оврагов. С начала 2000-х годов на 5 активно растущих оврагах различного типа (2 приводораздельных, 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 году, когда линейные приросты варьировали в пределах 2.3 – 21.8 м, площадные, соответственно – от 23.1 до 436.7 м², а объемные – 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 с коротким (2013-2021 гг.) периодом наблюдения. Здесь связь линейного прироста с площадным ($r=0.985$) и объ-

522 емным ($r=0.984$) размывами оказалась очень высокой. Достаточно высокой
 523 получилась связь линейного прироста с площадным ($r=0.819$) и объемным
 524 размывами ($r=0.792$) у донного одновершинного оврага на участке “Курего-
 525 во”. Высокая положительная связь линейного прироста с площадным
 526 ($r=0.792$) и объемным размывами ($r=0.756$) отмечена у придолинного оврага
 527 на правом склоне долины р. Вятка (“Крымская Слудка”), несмотря на обва-
 528 лование его вершины. Умеренная связь линейного прироста с площадным
 529 ($r=0.629$) и объемным размывами ($r=0.429$) оказалась у приводораздельного
 530 одновершинного оврага на ключевом участке “Вятское”. Очень слабая поло-
 531 жительная связь линейного прироста с площадным ($r=0.348$) и объемным
 532 размывами ($r=0.326$) обнаружилась у приводораздельного оврага, растущего
 533 тремя вершинами на участке “Кулюшево”. Не обнаружена связь линейного
 534 прироста как с площадным ($r=0.280$), так и с объемным размывами ($r=0.289$)
 535 только у вершинного оврага (“Варзи-Ятчи”), растущего в верховьях днища
 536 голоценовой балки тремя вершинами, что объясняется формированием но-
 537 вых ложбин стока, возникающих при обработке пахотных земель на водо-
 538 сборе и более интенсивным развитием его отвершков. Во всех случаях отме-
 539 чается плавное изменение по годам площадного и объемного приростов и
 540 достаточно резкое колебание величин линейного прироста вершин оврагов,
 541 независимо от типа и их морфометрических особенностей. Для всех рассмат-
 542 риваемых оврагов выявлена очень высокая связь между площадным и объ-
 543 емным приростом, что является очевидным. Асинхронность линейного, пло-
 544 щадного и объемного приростов исследуемых оврагов не совпадает по годам
 545 и не всегда связана с гидрометеорологическими показателями. Здесь сушест-
 546 венное влияние могут оказывать склоновые процессы, инициированные вы-
 547 ходом верховодки и грунтовых вод в днище оврага, а в некоторых случаях и
 548 суффозия. Зависимость их ежегодного прироста от условий земплепользова-
 549 ния на водосборе и их морфолого-морфометрических особенностей досто-
 550 верно не установлена.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации "Русское географическое общество" (Договор № 31/2020-P).

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

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 // Вестник Удмуртского университета. Серия 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. *Григорьев И.И., Рысин И.И.* Техногенные овраги на территории Удмуртии. Казань: Изд-во Удмурт. ун-та, Изд-во АН РТ, 2017. 190 с.
7. *Болысов С.И., Тарзаева Н.В.* Метеорологический фактор в развитии регрессивной эрозии на юго-западе Подмосковья // Геоморфология. 1996. № 4. С. 97 – 103.

- 579 8. *Григорьев И.И.* Использование программного комплекса «Credo» для
580 определения объемов и площадей оврагов // Вестник Удмуртского универси-
581 тета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2009. Вып. 2. С. 141–145.
- 582 9. *Рыжов Ю.В.* Овражная эрозия в межгорных котловинах Юго-
583 Западного Прибайкалья // Геоморфология. 1998. № 3. С. 68–73.
- 584 10. *Назаров Н.Н.* Овражная эрозия в Прикамье. Пермь: Изд-во Перм. ун-та,
585 1992. – 104 с.
- 586 11. *Рычагов Г.И.* Общая геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 416
587 с.
- 588 12. *Дедков А.П., Рысин И.И., Чернышева Т.Н.* Овражная эрозия на пахот-
589 ных землях Европы // Геоморфология. 1993. № 2. С. 3–13.
- 590 13. *Зорина Е.Ф., Никольская И.И., Ковалев С.Н.* Методика определения ин-
591 тенсивности роста оврагов // Геоморфология. 1993. №3. С. 66–75.
- 592 14. *Коротина Н.М.* Скорость роста оврагов в Ульяновском Поволжье //
593 Геоморфология. 1981. №4. С. 78–83.
- 594 15. *Рысин И.И.* О современном тренде овражной эрозии в Удмуртии //
595 Геоморфология. 1998. № 3. С. 92–101.
- 596 16. *Григорьев И.И., Рысин И.И.* Оценка линейного и площадного прироста
597 оврагов с применением инструментальных методов (на примере Удмуртии) //
598 Геоморфология. 2021. Том 52, № 3. С. 64–78.
- 599 17. *Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М., Гурьянов*
600 *В.В., Аухадеев Т.Р.* Климатические изменения в Приволжском федеральном
601 округе в XIX – XXI веках // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 36–46.
- 602 18. *Переведенцев Ю.А., Шумихина А.В., Шанталинский К.М., Гурьянов*
603 *В.В.* Опасные гидрометеорологические явления на территории Приволжского
604 федерального округа // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 20–30.
- 605 19. Атлас Удмуртской Республики (под ред. И.И. Рысина). М.: Изд-во
606 “Феория”, 2016. 282 с.

- 607 20. Акмаров П.Б., Князева О.П., Рысин И.И. Агроклиматический потенциал
608 эффективности земледелия // Вестник Удмуртского ун-та. Сер. Биология.
609 Науки о Земле. Вып. 2., 2014. – С.89 - 96.
- 610 21. Сельское хозяйство Удмуртской Республики (Территориальный орган
611 Федеральной службы государственной статистики по УР). Ижевск: 2019.
612 122 с.
- 613 22. Гусаров А., Рысин И.И., Шарифуллин А. Г., Голосов В.Н. Оценка совре-
614 менного тренда эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распахивае-
615 мом водосборе с использованием цезия-137 в качестве хрономаркера (юг
616 Удмуртской Республики) // Геоморфология. 2019. № 2. С. 37 – 56.
- 617 23. Сатдаров А.З. Методы исследования регрессивного роста оврагов:
618 достоинства и недостатки // Уч. записки Казанского университета. Сер. Есте-
619 ственные науки. 2016. № 158(2). С. 277–292.
- 620 24. Usmanov B., Yermolaev O., Gafurov A. Estimates of slopeerosion intensity
621 utilizing terrestrial laser scanning // Proceedings of the International Association of
622 Hydrological Sciences. 2015. (367). P. 59–65.
- 623 25. Гафуров А.М., Усманов Б.М. Оценка интенсивности и динамики поч-
624 венной эрозии методом наземного лазерного сканирования // Эрозионные,
625 русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университе-
626 тов). 2016. С. 81–90
- 627 26. Frankl A., Stal C., Abraha A., Nyssen J., Rieke-Zapp D., De Wulf A., Poesen
628 J. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling.
629 Catena, 2015. (127). P. 92-101.
- 630 27. Marzolf I., Ries J.B., Poesen J. Short-term versus mediumterm monitoring
631 for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment // Earth Sur-
632 face Processes and Landforms. 2011. № 12(36). P. 1604–1623.
- 633 28. Rishikeshan C.A., Katiyar S.K., Mahesh V.N.V. Detailed Evaluation of DEM
634 Interpolation Methods in GIS Using DGPS Data // 2014 International Conference
635 on Computational Intelligence and Communication Networks. 2014. P. 666–671.

29. *Li W., Fu H., Yu L., Gong P., Feng D., Li C., 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. № 23(37). P. 5632–5646.
30. *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.
31. *Kociuba W., Janicki G. Rodzik J., Stepniewski K.* Comparison of volumetric and remote sensing methods (TLS) for assessing the development of a permanent forested loess gully // *Natural Hazards*. 2015. № S1 (79). P. 139-158.
32. *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, A. Gymez-Gutierrez* // *Geomorphology*, 2016. No. 274. P. 143-151.
33. *Chen, Y.* Accuracy Assessment of the Planar Morphology of Valley Bank Gullies Extracted with High Resolution Remote Sensing Imagery on the Loess Plateau / *Y. Chen, J. Jiao, Y. Wei, H. Zhao, W. Yu, B. Cao, H. Xu, F. Yan, D. Wu, H. Li* // *Int. J. Environ. Res. Public Health, China*, 2019. № 16. 369 p.
34. *Khoboso Elizabeth Seutloali, Heinz Reinhard Beckedahl, Timothy Dube & Mbulisi Sibanda* (2016) 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.
35. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
36. *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. Научный ред. Р.С. Чалов. М. 2003. С. 76-92.

37. *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.
38. *Rafaello, B.; Reis, E.* Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression based exploration using reconstructed pre-erosion topography. *Catena* 2016, 147, 621–631.
39. *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.
40. Овражная эрозия востока Русской равнины (под ред. А.П. Дедкова). Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1990. – 144 с.
41. *Рыжов Ю.В.* Формирование оврагов на юге Восточной Сибири / РАН, Сибирское отделение, Институт географии им. В.Б. Сочавы. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2015. 180 с.
42. *Базарова Л.Д.* Эрозионные формы рельефа Чикойской впадины // Геология, палеовулканология и рельеф Забайкалья. Улан-Удэ, 1986. С. 153-162.
43. *Тармаев В.А.* Интенсивность образования линейной эрозии в бассейне р. Куналейки (Забайкалье) // География и природные ресурсы. 1992. № 1. С. 98-102.
44. *Ionita I.* Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // *Catena*. 2006. Vol. 68. P. 133–140.
45. *Ionita, I.* Gully development in eastern Romania: a case study from Falciu Hills / I. Ionita, L. Niacsu, G. Petrovici, A.M. Blebea-Apostu // *Nat Hazards*. 2015. No. 79(1). P. 113-138.
46. *Rodzik J., Furtak T., 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. № 14. P. 1938–1950.

- 691 47. *Ximeng Xu, Fenli Zheng, Chao Qin, and Hongyan Wu* Active stage gully
 692 morphological characteristics in the Loess Hilly-gully Region based on 3D laser
 693 scanning technique // Submitted Abstracts 7th International Symposium on Gully
 694 Erosion 23-27 may 2016, West Lafayette, USA. P. 24 - 25.
- 695 48. *Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A.,*
 696 *Golosoov, V., Bezerra, J.F.R., Bolysov, S., Dvinskih, A., Frankl, A., Fuseina, Y.,*
 697 *Guerra, A.J.T., Haregeweyn, N., Ionita, I., Makanzu Imwangana, F., Moeyersons,*
 698 *J., Moshe, I., Nazari Samani, A., Niacsu, L., Nyssen, J., Otsuki, Y., Radoane, M.,*
 699 *Rysin, I., Ryzhov, Y.V., Yermolaev, O.* How fast do gully headcuts retreat? // Earth-
 700 Science Reviews, 2016. №154. P. 336–355.
- 701 49. *Paul Ollobarren, Rafael Giménez, Miguel A. Campo-Bescós, and Javier Casalí*
 702 Soil factors controlling gully erosion: an experimental approach // Submitted Ab-
 703 stracts 7th International Symposium on Gully Erosion 23-27 may 2016, West
 704 Lafayette, USA. P. 20.

REFERENCE

705

- 706 1. Rysin I. I. *Ovrazhnaya erozia v Udmurtii* (Gully erosion in Udmurtia).
707 Izhevsk: UdSU (Publ.), 1998. 274 p (in Russ.).
- 708 2. *Geographia ovrazhnoy erozii*. Pod red. E.F. Zorinoy. (Geography of gully
709 erosion. Ed. by E.F. Zorinoy). Moscow: MSU (Publ.), 2006. 324 p (in Russ.).
- 710 3. Grigorev I. I., Rysin I. I. *Issledovaniya tehnogennyh i selskohozyaistvennih*
711 *ovragov v Udmurtii* (Research of technogenic and agricultural ravines in
712 Udmurtia). Vestnik Udm. Un-ta. Ser. Biol. Nauki o Zemle. 2006. Iss. 2. P. 83-91
713 (in Russ.).
- 714 4. Grigorev I. I. *Prostranstvenno-vremennoy analiz skorostey rosta*
715 *tehnogennyh ovragov na territorii Udmurtii* (Spatiotemporal analysis of growth
716 rates of technogenic ravines on the territory of Udmurtia). Erozia pochv,
717 ovrazhnaya erozia, usloviya process: teoreticheskie i prikladnye voprosy. Moscow:
718 MSU (Publ.), 2011. P. 90 - 99 (in Russ.).
- 719 5. Rysin I. I., Grigorev I. I., Zaitseva M. Yu. *Rezultaty issledovaniya ovrazhnoy*
720 *erozii v Udmurtii za poslednie dva desyatiletiya* (Results of research of gully ero-
721 sion in Udmurtia for the last two decades). Nauka Udmurtiya. No. 3 (73), 2015.
722 P.150 – 164 (in Russ.).
- 723 6. Grigorev I. I., Rysin I. I. *Tehnogennyye ovragi na territorii Udmurtii*
724 (Technogenic ravines on the territory of Udmurtia). Kazan: Izd-vo Udmurt. Un-ta,
725 Izd-vo Akademii nauk RT. 2017. 190 p (in Russ.).
- 726 7. Bolysov S. I., Tarzaeva N. V. *Meteorologicheskiy faktor v razvitii*
727 *regressivnoy erozii na yugo-zapade Moskvi* (Meteorological factor in the develop-
728 ment of regressive erosion in the South-West of the Moscow region).
729 Geomorphologiya. 1996. No. 4. P. 97-103 (in Russ.).
- 730 8. Grigorev I. I. *Ispolzovanie programmnoy kompleksa «Credo» dlya*
731 *opredeleniya obyemov i ploshcadey ovragov* (Using the software complex "Credo"
732 to determine the volume and area of ravines). Vestnik Udm. Un-ta. Ser. Biol.
733 Nauki o Zemle. 2009. Iss. 2. P. 141-145 (in Russ.).

- 734 9. Ryzhov Yu.V. *Ovrazhnaya eroziya v mezhgornyh kotlovinah Yugo-*
 735 *Zapadnogo Pribajkal'ya* (Gully erosion in the intermountain basins of the South-
 736 western Baikal Region). *Geomorfologiya*. 1998. No 3. P. 68-73(in Russ.).
- 737 10. Nazarov N.N. *Ovrazhnaya eroziya v Prikam'e* (Gully erosion in Prikam'e).
 738 – Perm: Izd-vo Perm. un-ta, 1992. 104 p (in Russ.).
- 739 11. Rychagov G. I. *Obshaya geomorphologiya* (General geomorphology). Mos-
 740 cow: MSU. 2006. 416 p (in Russ.).
- 741 12. Dedkov A. P., Rysin I. I., Chernysheva T. N. *Ovraghnaya erozia na*
 742 *pahotnyh zemlyah Evropy* (Gully erosion on arable lands of Europe).
 743 *Geomorphologiya*. 1993. No. 2. P. 3-13 (in Russ.).
- 744 13. Zorina E. F., Nikolskaya I. I., Kovalev S. N. *Metodika opredeleniya*
 745 *intensivnosti rosta ovragov* (Method for determining the intensity of growth of ra-
 746 vines). *Geomorphologiya*. 1993. No. 3. P. 66-75 (in Russ.).
- 747 14. Korotina N. M. *Skorost rosta ovragov v Ulyanovskom Povolzh'ye* (The
 748 growth rate of ravines in the Ulyanovsk Volga region). *Geomorphologiya*. 1981.
 749 No. 4. P. 78-83 (in Russ.).
- 750 15. Rysin I. I. *O sovremennom trende ovrazhnoj erozii v Udmurtii* (About the
 751 current trend of gully erosion in Udmurtia). *Geomorfologiya*. 1998. No 3. P. 92–
 752 101 (in Russ.).
- 753 16. Grigorev I.I., Rysin I.I. *Ocenka linejnogo i ploshchadnogo prirosta ovragov*
 754 *s primeneniem instrumental'nyh metodov (na primere Udmurtii)* (Assessment of
 755 linear and areal growth of ravines using instrumental methods (on the example of
 756 Udmurtia) // *Geomorfologiya*. 2021. Tom 52, No 3. P. 64–78 (in Russ).
- 757 17. Perevedencev YU.P., Sherstyukov B.G., Shantalinskij K.M., Guryanov
 758 V.V., Auhadeev T.R. *Klimaticheskie izmeneniya v Privolzhskom federal'nom*
 759 *okruge v XIX – XXI vekah* (Climatic changes in the Volga Federal District in the
 760 XIX – XXI centuries) // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020. No 6. P. 36–46 (in
 761 Russ).

- 762 18. Perevedencev Yu.A., Shumihina A.V., Shantalinskij K.M., Guryanov V.V.
 763 *Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Privolzhskogo*
 764 *federal'nogo okruga* (Dangerous hydrometeorological phenomena on the territory
 765 of the Volga Federal District) // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2019. No 12. P. 20–
 766 30 (n Russ).
- 767 19. *Atlas Udmurtskoj Respubliki* (pod red. I.I. Rysina). (Atlas of the Udmurt Re-
 768 public) M.: Izd-vo “Feoriya”, 2016. 282 p (in Russ.).
- 769 20. Akmarov P.B., Knyazeva O.P., Rysin I.I. *Agroklimaticheskij potencial*
 770 *effektivnosti zemledeliya* (Agroclimatic potential of agricultural efficiency) //
 771 *Vestnik Udmurtskogo un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*. Iss. 2, 2014. P.89 – 96
 772 (in Russ.).
- 773 21. *Selskoe hozyajstvo Udmurtskoj Respubliki (Territorialnyj organ Federalnoj*
 774 *sluzhby gosudarstvennoj statistiki po UR)* (Agriculture of the Udmurt Republic
 775 (Territorial body of the Federal State Statistics Service for UR). Izhevsk: 2019. 122
 776 p (in Russ).
- 777 22. Gusarov A., Rysin I. I., Sharifullin A. G., Golosov V. N. *Otzenka*
 778 *sovremennogo trenda erozionno-akkumulyativnih processov v malom*
 779 *raspahivaemom vodosbore s ispolzovaniem ceziya-137 v kachestve hronomarkera*
 780 *(yug Udmurtskoy Respubliki)* (Assessment of the current trend of erosion-
 781 accumulative processes in a small ploughed watershed using caesium-137 as a
 782 chronomarker (South of the Udmurt Republic). *Geomorphologiya*. 2019. No. 2. P.
 783 37 – 56 (in Russ.).
- 784 23. Satdarov A. Z. *Metody issledovanya regressivnogo rosta ovragov:*
 785 *dostoinstvs I nedostatki* (Methods of research of regressive growth of ravines: ad-
 786 vantages and disadvantages). *Uch. Zapiski Kazan. Un-ta. Ser. Estestv. nauki*. 2016.
 787 No. 158(2). P. 277–292 (in Russ.).
- 788 24. Usmanov B., Yermolaev O., Gafurov A. Estimates of slopeerosion intensity
 789 utilizing terrestrial laser scanning. *Proceedings of the International Association of*
 790 *Hydrological Sciences*. 2015. (367). P. 59–65. (in Russ.)

25. Gafurov, A. M., Usmanov B. M. *Otzenka intensivnosti I dinamiki pochvennoy erozii metodom nazemnogo lazernogo skanirovaniya* (Evaluation of intensity and dynamics of soil erosion by method of terrestrial laser scanning). Eroziionniye, rusloviye I ustyeviye process. Moscow: MSU (Publ.). 2016. P. 81–90 (in Russ.).
26. Frankl A., Stal C., Abraha A., Nyssen J., Rieke-Zapp D., De Wulf A., Poesen J. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling. *Catena*. 2015. (127). P. 92-101.
27. Marzolff I., Ries J.B., Poesen J. Short-term versus mediumterm monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2011. No. 12(36). P. 1604–1623.
28. Rishikeshan C.A., Katiyar S.K., 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.
29. Li W., Fu H., Yu L., Gong P., Feng D., Li C., 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.
30. Gafurov A.M., Rysin I. I., Golosov V. N., Grigorev I. I., Sharifullin A. G. *Otzenka sovremennogo rosta vershin ovragov uzhnogo megasklona Vostochno-Evropeyskoy ravniny s primeneniem nabora instrumentalnyh metodov*. (Estimation 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, Ser. 5. Geogr. 2018. No. 5. P. 61-71 (in Russ.).
31. Kociuba W., Janicki G. Rodzik J., 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.

- 818 32. Caraballo-Arias, N.A. Morphometric and hydraulic geometry assessment of
819 a gully in SW Spain / N.A. Caraballo-Arias, C. Conoscenti, C. Di Stefano, V. Fer-
820 ro, A. Gyzmez-Gutierrez // *Geomorphology*, 2016. No. 274. P. 143-151.
- 821 33. Chen, Y. Accuracy Assessment of the Planar Morphology of Valley Bank
822 Gullies Extracted with High Resolution Remote Sensing Imagery on the Loess
823 Plateau / Y. Chen, J. Jiao, Y. Wei, H. Zhao, W. Yu, B. Cao, H. Xu, F. Yan, D. Wu,
824 H. Li // *Int. J. Environ. Res. Public Health*, China, 2019. № 16. – 369 p.
- 825 34. Khoboso Elizabeth Seutloali, Heinz Reinhard Beckedahl, Timothy Dube &
826 Mbulisi Sibanda (2016) An assessment of gully erosion along major armoured
827 roads in south-eastern region of South Africa: a remote sensing and GIS approach,
828 Geocarto International, 31:2. P. 225-239.
- 829 35. Lakin G. F. *Biometriya* (Biometrics). Moscow: Vysshaya shkola. 1990. 352
830 p (in Russ.).
- 831 36. Veretennikova M.V., Zorina E.F., Kovalev S.N., Lyubimov B.P.
832 *Stacionarnye issledovaniya processov ovrageobrazovaniya na Borovskom*
833 *uchebno-nauchnom poligone geograficheskogo fakulteta MGU* (Stationary studies
834 of the processes of ravine formation at the Borovsky educational and scientific
835 training ground of the Faculty of Geography of Moscow State University) *Eroziya*
836 *pochv i usloviya processy*. Iss. 14. Nauchnyj red. R.S. Chalov. M. 2003. P. 76-92
837 (in Russ.).
- 838 37. Rysin I.I., Grigorev I.I., Zaitseva M.Yu., Golosov V.N. *Lineinyy prirost*
839 *ovragov Vyatsko-Kamskogo mezhdurechia na rubeghe XX I XXI stoletiy* (Dynam-
840 ics of the linear retreat of gully heads within the Vyatka-Kama interfluvium at the
841 turn of 20th century). *Vest. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geogr.* 2017. No. 1. P. 63-72 (in
842 Russ.).
- 843 38. Raffaello, B., Reis, E. Controlling factors of the size and location of large
844 gully systems: A regression based exploration using reconstructed pre-erosion to-
845 pography. *Catena* 2016, 147, P. 621–631.

- 846 39. Butakov G.P., Zorina E.F., Nikolskaya I.I., Rysin I.I., Serebrennikova I.A.,
 847 Yusupova V.V. *Tendencii razvitiya ovrazhnoj erozii v Evropejskoj Rossii* (Trends
 848 in the development of gully erosion in European Russia). *Erozionnye i ruslovyje*
 849 *processy*. M.: Izd-vo MGU, 2000. Iss. 3. P. 52–62 (in Russ.).
- 850 40. *Ovrazhnaya eroziya vostoka Russkoj ravniny* (pod red. A.P. Dedkova). (Ra-
 851 vine erosion of the East of the Russian Plain (ed. by A.P. Dedkov). Kazan: Izd-vo
 852 Kazan. un-ta, 1990. – 144 p (in Russ).
- 853 41. Ryzhov Yu.V. *Formirovanie ovragov na yuge Vostochnoj Sibiri* (Formation
 854 of ravines in the south of Eastern Siberia). RAN, Sibirskoe otd-nie, Institut
 855 geografii im. V.B. Sochavy. Novosibirsk: Akadem. izd-vo «Geo», 2015. 180 p (in
 856 Russ.).
- 857 42. Bazarova L.D. *Erozionnye formy relefa Chikojskoj vpadiny* (Erosive land-
 858 forms of the Chikoy Depression). *Geologiya, paleovulkanologiya i relief*
 859 *Zabajkalya*. Ulan-Ude`, 1986. P. 153-162 (in Russ.).
- 860 43. Tarmaev V.A. *Intensivnost obrazovaniya linejnoj erozii v bassejne r.*
 861 *Kunalejki (Zabajkale)* (The intensity of the formation of linear erosion in the basin.
 862 Kounalaki (Transbaikalia)). *Geografiya i prirodny'e resursy`*. 1992. № 1. P. 98-
 863 102 (in Russ.).
- 864 44. Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // *Catena*.
 865 2006. Vol. 68. P. 133–140.
- 866 45. Ionita, I. Gully development in eastern Romania: a case study from Falciu
 867 Hills / I. Ionita, L. Niacsu, G. Petrovici, A.M. Blebea-Apostu // *Nat Hazards*. 2015.
 868 No. 79(1). P. 113-138.
- 869 46. Rodzik J., Furtak T., Zglobicki W. The impact of snowmelt and heavy rain-
 870 fall runoff on erosion rates in a gully system, Lublin Upland, Poland // *Earth Sur-*
 871 *face Processes and Landforms*, 2009. Vol. 34. № 14. P. 1938–1950.
- 872 47. Ximeng Xu, Fenli Zheng, Chao Qin, and Hongyan Wu Active stage gully
 873 morphological characteristics in the Loess Hilly-gully Region based on 3D laser

- 874 scanning technique // Submitted Abstracts 7th International Symposium on Gully
875 Erosion 23-27 may 2016, West Lafayette, USA. P. 24 - 25.
- 876 48. Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A.,
877 Golosov, V., Bezerra, J.F.R., Bolysov, S., Dvinskih, A., Frankl, A., Fuseina, Y.,
878 Guerra, A.J.T., Haregeweyn, N., Ionita, I., Makanzu Imwangana, F., Moeyersons,
879 J., Moshe, I., Nazari Samani, A., Niacsu, L., Nyssen, J., Otsuki, Y., Radoane, M.,
880 Rysin, I., Ryzhov, Y.V., Yermolaev, O. How fast do gully headcuts retreat? Earth-
881 Science Reviews, 2016. №154. P. 336–355.
- 882 49. Paul Ollobarren, Rafael Giménez, Miguel A. Campo-Bescós, and Javier
883 Casalí Soil factors controlling gully erosion: an experimental approach // Submit-
884 ted Abstracts 7th International Symposium on Gully Erosion 23-27 may 2016,
885 West Lafayette, USA. P. 20.

**АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНОГО,
ПЛОЩАДНОГО И ОБЪЕМНОГО ПРИРОСТА ОВРАГОВ НА
ТЕРРИТОРИИ УДМУРТИИ**

Рассматриваются инструментальные методы изучения линейного, площадного и объемного роста оврагов на сельскохозяйственных землях за период с начала 2000-х до 2021 гг. Инструментальные 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 (приводораздельные, придолинный, вершинный, донный и пойменный), развивающихся в пределах 6 ключевых участков, где их водосборные площади являются пахотными угодьями, используемыми под посевы зернобобовых и кормовых культур. Основной целью исследований является выявление связи между линейным, площадным и объемным приростом оврагов в зависимости от их морфолого-морфометрических характеристик и особенностей водосборов. Для большинства рассматриваемых оврагов максимальные размывы наблюдались в 2001 году, когда линейные приросты вершин варьировали в пределах 2.3 – 21.8 м, площадные – 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. 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 ($r=0.984$) размывами оказалась очень высокой. Достаточно высокой получилась связь линейного прироста с площадным ($r=0.819$) и объемным размывами ($r=0.792$) у донного одновершинного оврага на участке “Курегово”. Высокая положительная связь линейного прироста с площадным ($r=0.792$) и объемным размывами ($r=0.756$) отмечена у придолинного оврага на правом склоне долины р. Вятка (“Крымская Слудка”), не-

смотря на обвалование его вершины. Умеренная связь линейного прироста с площадным ($r=0.629$) и объемным размывами ($r=0.429$) оказалась у приводораздельного одновершинного оврага на ключевом участке “Вятское”. Очень слабая положительная связь линейного прироста с площадным ($r=0.348$) и объемным размывами ($r=0.326$) 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 размывами ($r=0.289$) только у вершинного оврага (“Варзи-Ятчи”), растущего в верховьях днища голоценовой балки тремя вершинами, что объясняется более интенсивным развитием его отвершков. Для всех рассматриваемых оврагов выявлена очень высокая связь между площадным и объемным приростом. Асинхронность линейного, площадного и объемного приростов исследуемых оврагов не всегда связана с гидрометеорологическими факторами, что можно объяснить влиянием склоновых процессов, а в некоторых случаях и суффозией. Выявлено плавное изменение по годам площадного и объемного размывов 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 выявлена.

Ключевые слова: рост оврагов, инструментальная съемка, мониторинг, корреляционный анализ.

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

The Instrumental methods of studying linear, areal and volumetric growth of gullies on agricultural lands over the period from the early 2000s to 2021 are considered. The Instrumental research methods included a planned geodetic survey of the top part of the gullies, including the edges, the talweg and transverse profiles using an electronic tachometer. The objects of the study include 6 gullies of various types (at the watershed, near-valley, top, bottom and floodplain), developing within 6 key areas, where their catchment areas are arable land used for crops of legumes and fodder crops. The main purpose of the research is to identify the relationship between the linear, areal and volumetric growth of gullies, depending on their morphological and morphometric characteristics and features of the watersheds. For most of the gullies under consideration, the maximum washouts were observed in 2001, when the linear headcuts retreat varied in the limits of 2.3 - 21.8 m, the area - from 23.1 to 436.7 m², and the volume, respectively, from 398 to 3068 m³, but there were exceptions when the linear increments had a maximum in 2011. It was found that in most cases there is a clear dependence between the considered indicators, which is most typical for a floodplain gully 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”), despite the earthen rampart of its top. A moderate relationship of linear growth with areal ($r=0.629$) and volumetric washouts ($r=0.429$) was found at the single-top gully in the key areal “Vyatskoye”. A

very weak positive relationship of linear growth with areal ($r=0.348$) and volumetric washouts ($r=0.326$) was found at the watershed gully growing with three headcuts on the Kulyushevo site. No connection was found between linear growth with both areal ($r=0.280$) and volumetric erosion ($r=0.289$) only at the top gully (“Varzi-Yatch”) growing in the upper reaches of the Holocene gulch bottom with three headcuts, which is explained by the more intensive development of its screw-drivers. For all the gullies under consideration, a very high correlation was found between the area and volume growth. The asynchrony of the linear, area and volume increments of the studied gullies is not always associated with hydrometeorological 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 of the 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.

Keywords: growth of ravines, instrumental survey, monitoring, correlation analysis.