

СОВРЕМЕННАЯ ОВРАЖНАЯ ЭРОЗИЯ В ЛЕСНЫХ И ЛЕСОСТЕПНЫХ ЛАНДШАФТАХ ВОСТОКА РУССКОЙ РАВНИНЫ

© 2021 г. О. П. Ермолаев^{1,*}, Р. А. Медведева¹, М. А. Иванов¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: oyermol@gmail.com

Поступила в редакцию 05.03.2021 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Проведена пространственно-временная оценка современной овражной эрозии на территории Республики Татарстан – крупного региона (более 68000 км²) востока Русской равнины, расположенного на стыке лесных (подзоны южнотаежных, смешанных и широколиственных лесов) и лесостепных ландшафтов. Регион отличается, установленной еще более полувека назад, высокой степенью овражного расчленения; на него имеются разновременные картографические данные о густоте овражной сети, полученные по единой методике. Современная заовраженность определена методом визуального дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения за 2010–2017 гг. Создана геопространственная база данных и сформирована система дешифровочных признаков овражных форм. Геоинформационное картографирование осуществлялось с выделением тальвегов оврагов и их классификацией на склоновые, береговые и донные типы. Для количественной оценки овражной эрозии определялись два показателя: густота и плотность овражной сети, где в качестве операционной территориальной единицы использован бассейновый подход. Создана геобаза данных овражного расчленения по 1674 бассейнам. Всего на территории исследования идентифицировано 9142 оврага, средняя длина которых составила 74 м. Показатель современной густоты овражной сети распределяется неравномерно по площади; его средние значения составляют 12 м/км², максимальные – 405 м/км². Изменение плотности оврагов пространственно совпадает с распределением густоты расчленения, составляя в среднем 0.2 ед/км², максимум – 5 ед/км². Среди морфолого-генетических типов оврагов доминируют склоновые (90%), на береговые и донные приходится 7 и 3% соответственно. Временная динамика площадной формы и линейного прироста активных оврагов, в основном склонового типа, определена для 304 оврагов путем совмещения каждой овражной формы на двух разновременных космических снимках, полученных за относительно короткий период (2009–2016 годы). Установлено, что средний линейный прирост оврагов составляет 0.6 м/год, а средний площадной прирост – 28 м²/год. Пространственно-временная динамика густоты овражной сети в речных бассейнах определена путем сравнения данных картографирования современной овражной сети с результатами, полученными при картографировании оврагов по аэрофотоснимкам 1960–1970-х годов. Во всех ландшафтных условиях густота оврагов существенно сократилась, что свидетельствует о затухании процессов оврагообразования. В среднем на территории исследования во всех бассейнах густота овражной сети уменьшилась на 230 м/км². На общем фоне сокращения лишь в отдельных бассейнах овражность незначительно увеличилась. Минимальные значения густоты оврагов в настоящее время соответствуют бассейнам с высокими показателями залуженности территории. Гидроклиматические изменения (повышение зимних температур, уменьшение глубины промерзания почвы и поверхностного талого стока), сокращение площади пахотных земель, эволюция оврагов (переход овражных форм в балочную стадию), посадка защитных лесополос – определили нисходящий тренд развития оврагов на территории исследования.

Ключевые слова: овраг, бровка, тальveg, овражная сеть, космические снимки, линейный прирост, площадной прирост

DOI: 10.31857/S0435428121040064

ВВЕДЕНИЕ

Овражная эрозия является серьезной проблемой во многих частях мира, так как представляет собой одну из главных причин деградации почвы. Занимая огромные территории наиболее освоен-

ных в сельскохозяйственном отношении земель, этот эрозионный процесс отличается высокими скоростями развития и большими объемами размываемых и переносимых грунтов [1]. В этой связи оценка темпов развития оврагов в разных климатических условиях и в разных условиях земле-

пользования по-прежнему остается важным аспектом прогнозирования влияния эрозии на окружающую среду [2, 3].

Картографирование современной овражной эрозии на основе полевых методов с использованием данных дистанционного зондирования проведено во многих регионах мира [3–10 и др.]. Пространственное развитие современных оврагов с использованием данной методики в нашей стране оценено в крупном регионе азиатской части России – на юге Восточной Сибири [11], в Удмуртии [12], завершены наши работы по Ульяновской, Саратовской областям и Чувашии. Однако практически нет данных, характеризующих современную овражность на всей территории России. Как правило, все предыдущие работы в наиболее освоенных сельскохозяйственных районах европейской части России, учитывая исходные для картографирования оврагов материалы, были завершены 30–50 лет назад.

Несмотря на то что овражно-балочные системы распространены практически во всех регионах суши Земли и к ним приковано внимание геоморфологов, – отсутствуют общепринятые критерии выделения данных эрозионных форм [12]. Древние эрозионные формы (балки) имеют общие особенности, отличающие их от современных форм линейной эрозии, – это плавность, закругленность бровок, широкие днища, а также задернованность склонов. К формам свежего линейного размыва, имеющих обнаженные склоны, относятся овраги. Из всех существующих форм линейной эрозии на склонах в рамках данного исследования изучались только овраги. Критерии выделения оврагов при дешифрировании космических снимков и их отличительные особенности отображения подробно описаны ниже в разделе методики. За основу было взято деление оврагов на первичные, к которым отнесены склоновые и береговые, а также вторичные, представленные донными овражными формами.

Технические разработки в области дистанционного зондирования, позволяющие получать изображения с высоким и очень высоким пространственным и временным разрешением, появление информационных порталов открытого доступа, а также технологии цифровой обработки изображений и ГИС, – создали принципиально новые возможности для исследования овражной эрозии. Кроме того, наметился переход от визуального дешифрирования к полностью автоматизированному выделению оврагов. Существующие подходы полуавтоматизированного выделения оврагов базируются либо на объектно-ориентированном выделении на основе многоспектральных снимков, либо на выделении оврагов на основе вероятностной модели, полученной с использованием цифровых моделей рельефа, либо

на использовании сверхточных нейронных сетей [13]. В то же время визуальная интерпретация изображений дистанционного зондирования по-прежнему является надежным и распространенным методом благодаря убедительной точности этого способа [14].

Цель исследования – пространственно-временная оценка овражной эрозии и тенденции ее развития в лесных и лесостепных природно-антропогенных ландшафтах востока Русской равнины. Территория исследования ограничена субъектом РФ – Республикой Татарстан (РТ).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Республика Татарстан расположена на востоке Русской равнины. Площадь ее территории 68,4 тыс. км². Долинами рек Волги и Камы расположена на три части: северную – Предкамье, западную – Предволжье и юго-восточную – Закамье (рис. 1). Каждая часть представляет собой своеобразный физико-географический регион.

Ландшафтные условия развития овражной эрозии. Рельеф территории возвышенно-равнинный с максимальными абс. высотами 240–380 м. Находится в пределах Волго-Уральской антеклизы – крупнейшей положительной структуры востока Русской плиты. Преобладающими горными породами, на которых главным образом сформировались овраги, служат глинисто-известняковые и глинисто-мергельные отложения верхней перми, песчано-глинистые образования юры и нижнего мела, а также песчано-суглинистые отложения неогена и плейстоцена. Климат умеренно континентальный с теплым летом и умеренно холодной зимой. Средняя температура января –14°С, июля +19°С. Среднее годовое количество осадков 509 мм, из них на теплый период приходится 351 мм, на холодный – 158 мм. Максимальное среднегодовое количество осадков выпадает за два летних месяца: июнь и июль (63 мм), минимальное – в марте (23 мм). Снежный покров появляется в третьей декаде октября, а сходит во второй декаде апреля [15]. В регионе Предкамья происходит смена бореальной ландшафтной зоны (площадь 14655 км²), на доминирующую в РТ по площади суббореальную северную семигумидную (южно-таежная и подтаежная подзоны). Суббореальная северная семигумидная зона включает: широколиственно лесную (24%) и лесостепную подзоны (75,8%), распространенные по всей территории Закамья и на западе Предволжья [16]. Природно-антропогенный фон развития овражной эрозии в различных физико-географических регионах территории представлен в табл. 1 [17]. В бореальной ландшафтной зоне преобладают светло-серые (43%), дерново-подзолистые (29%) и серые лесные почвы (10%). В суббо-

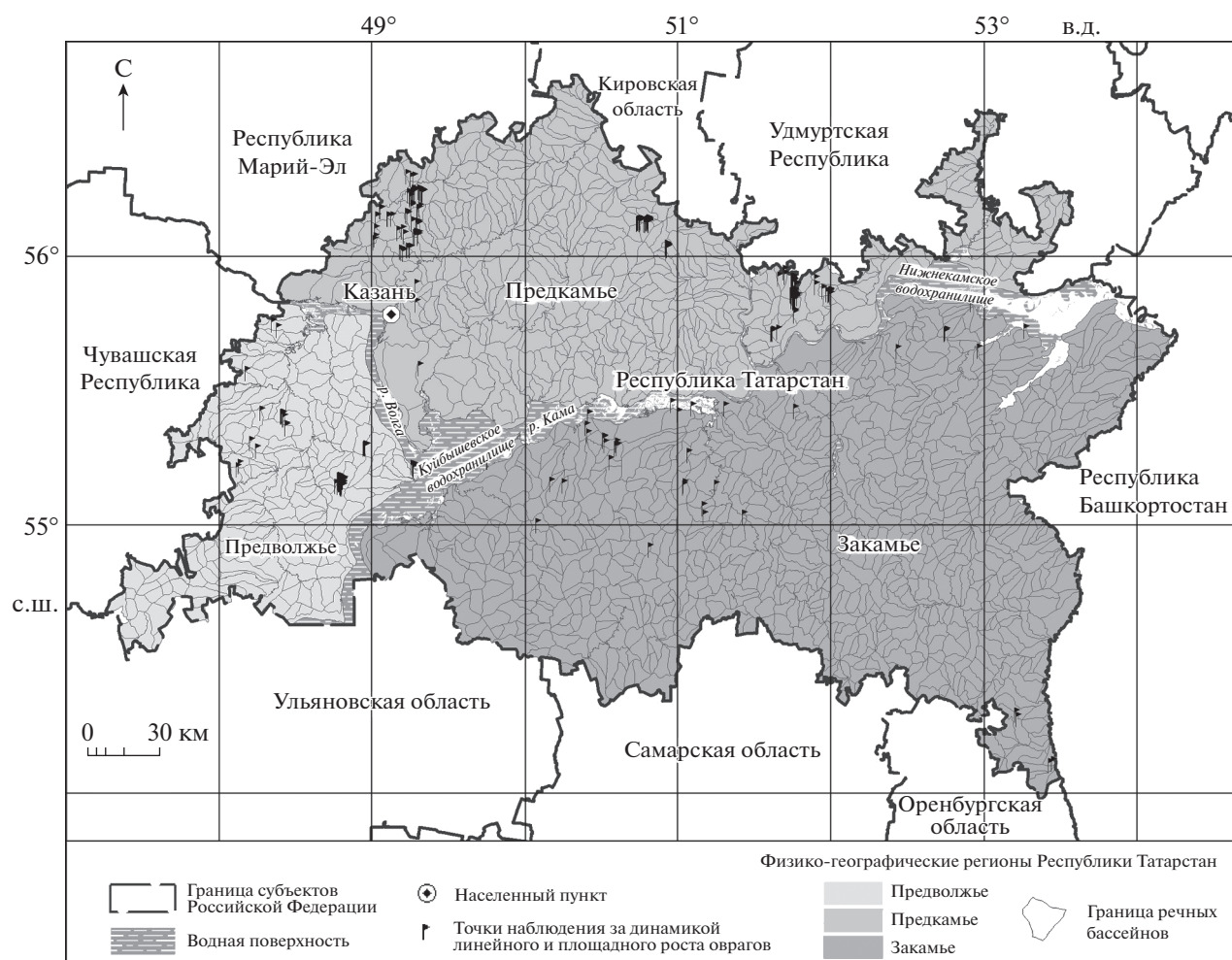


Рис. 1. Территория исследования и карта фактического материала.

реальной северной семигумидной ландшафтной зоне доминируют черноземы выщелоченные (28%) и серые лесные почвы (10%). В морфологической структуре господствуют средние (37.1%) и нижние части склонов (24%); меньше всего приходится на водораздельные местности (3.5%). Среди четвертичных отложений преобладают аллювиальные, элювиально-делювиальные, делювиально-солифлюкционные – 17, 39 и 40% соответственно. Среди рыхлых отложений в строении ландшафтов широколиственной подзоны больше всего делювиально-солифлюкционных суглинков (58%), в то время, как в лесостепной – элювиально-делювиальных отложений (47%), а делювиально-солифлюкционные составляют основу 34% геокомплексов. Состав растительных формаций в широколиственной и лесостепной подзонах следующий: дубравы (с культурами дуба) и липняки 65.2 и 34%, осинники и березняки – 16.1 и 50.7%; на сосняки и ельники (вместе с культурами) приходится 18.5 и 14.6%, на ивняки – 0.2 и 0.7% соответственно.

В ландшафтной структуре РТ преобладают склоновые типы местности (75%), при этом доминируют средние части склонов (37%). Именно на эти типы местности и приходится основное развитие оврагов.

За последние 50 лет произошли заметные изменения в структуре землепользования территории исследования. В период 1940–1988 годов площадь лесов сократилась на 175 тыс. га. [18]. С 2011 по 2016 г. площади земель лесного фонда не менялась (1236.4 тыс. га), только с 2017 по 2019 г. наблюдается небольшое снижение до 1236.0 тыс. га. [19]. Уменьшение сельскохозяйственных земель за период 1960–1990 годов происходило в пределах 5% [20], а за 2012–2014 гг. – на 9.3% [21].

Методика анализа современного овражного расчленения. Для получения данных о современной заовраженности исследуемой территории были подобраны (в программе “SAS.Планета”) наиболее качественные космические снимки высокого разрешения за 2010–2017 годы. Снимки, полученные в разные сезоны года, обладают существенно

Таблица 1. Природно-антропогенные условия развития оврагов в бассейнах Республики Татарстан [17]

| Характеристики природно-антропогенных условий | Предволжье | Предкамье | Закамье |
|---|------------|-----------|---------|
| Средняя абс. высота в бассейне, м | 129 | 120 | 150 |
| Средний уклон, мин | 97.5 | 83.9 | 96 |
| Глубина эрозионного расчленения, м | 120 | 107 | 119 |
| Длины линий тока в бассейне, м | 647 | 587 | 662 |
| Эрозионный потенциал рельефа в бассейне | 4.7 | 3.6 | 2.2 |
| Средняя годовая температура воздуха (1960–2014 годы), °С | 4.3 | 3.9 | 4 |
| Модуль стока воды (весь период наблюдений), м ³ /сек*км ² | 0.003 | 0.004 | 0.004 |
| Годовой слой стока воды (весь период наблюдений), мм | 110 | 119 | 111 |
| Лесистость, % | 9.3 | 17.8 | 18 |
| Распаханность, % | 51.5 | 38.5 | 48.3 |
| Залуженность, % | 34 | 38 | 32.1 |

различными особенностями по надежности дешифрирования ображных форм. Для картографирования тальвегов оврагов возможно использование даже зимних снимков, но к их недостаткам следует отнести сложность выделения бровок, а также ошибки при определении стадии развития оврагов (овраг-балка). Летние снимки позволяют получить наиболее точные данные о стадиях развития оврагов, но из-за маскирующей эти формы растительности возникают значительные трудности в обнаружении донных оврагов. Осенние и весенние снимки лучше всего подходят для картографирования ображной сети [22]. Для обеспечения надежности дешифрирования оврагов использовались снимки, имеющие высокое и сверхвысокое разрешение (0.5–1.5 м), которые по своей детальности обнаружения форм линейной эрозии не уступают крупномасштабным аэрофотоснимкам. В программе “SAS.Планета” такие снимки, полученные со спутников “WorldView-2”, “WorldView-3” и “GeoEye-1”, размещены на открытых ресурсах “Google”, “Яндекс”, “Bing”, “ESRI”.

Важный этап работ – формирование системы дешифровочных признаков. К ним относятся: а) плановая форма оврага, имеющая хорошо различимые границы; б) линейный и дендритообразный рисунок изображения с четко выраженной бровкой и тальвегом; в) косвенные признаки (тени, позволяющие идентифицировать поперечный профиль оврага); цвет и тон изображения – для детектирования обнаженных участков склона ображных форм. Выявлена также зависимость четкости отображения оврага на космическом снимке от цвета пород, в которых возник эрозионный врез. Надежно дешифрируются формы, имеющие тон изображения от светло-серого до почти белого за счет эрозионного врезания в карбонатно-кремнистые, известняковые, мел-мергельные горные породы. Для идентификации

оврагов на пограничных стадиях их развития были определены критерии, позволяющие исключить из дешифрирования собственно промоины, которые отличаются от ображной формы глубиной и шириной: менее 1.5 и 3 м соответственно. На снимках чаще используется критерий ширины линейного размыва. Такой порог в размерности нам представляется достаточно надежным. При меньшей ширине и глубине размывов эти линейные формы относятся уже собственно к промоинам и, как правило, запахиваются сельскохозяйственной техникой при обработке. Также при глубине более 1.5 м склоновые потоки полностью дренируют все почвенные горизонты и вскрывают материнскую породу (четвертичные и/или коренные отложения). Балочные формы имеют плохо выраженную бровку, трапециевидный поперечный профиль, заросшие луговой и древесно-кустарничковой растительностью склоны, а устье и вершина определяются не четко. Также необходимо отметить существующую большую неопределенность при классификации форм линейного размыва на склонах как среди отечественных, так и зарубежных геоморфологов. В первую очередь это относится к определению типа линейного размыва на склонах на пограничных стадиях развития оврагов. Поэтому очень часто картографирование оврагов как в поле, так и по материалам дистанционного зондирования производится на уровне экспертного мнения, а результаты картографирования могут существенно отличаться [23].

Как уже отмечалось, овраги были разделены по происхождению на первичные (склоновые и береговые) и вторичные (донные) овраги. К склоновым оврагам отнесены линейные формы длиной более 70–80 м и глубиной – свыше 1.5 м, имеющие хорошо выраженный водосбор и выходящие за бровку берегового уступа на склоны бассейнов. Короткие овраги, сформировавшиеся на

бортах речных долин, определялись как береговые. Вторичные врезы в днищах балочных форм и логов относились к донным оврагам. Также на исследуемой территории выявлены придорожные или техногенные овраги, происхождение которых обусловлено хозяйственной деятельностью человека.

В результате визуального дешифрирования овражных форм на территории исследования впервые создан векторный слой тальвегов оврагов. Результаты дешифрирования проверялись тремя экспертами для повышения надежности и исключения ошибок. С использованием алгоритмов программы “Easy Trace” верифицирована топология объектов слоя, исправлены геометрические ошибки. На ключевых участках, расположенных в РТ, проведена полевая верификация результатов дешифрирования. Было отобрано на местности 53 оврага различных типов и сформировавшихся в различных породах. В результате работ установлено, что только два из 53 тестовых оврагов (4%) не были идентифицированы при камеральном визуальном дешифрировании. В основном ошибки распознавания обусловлены качеством самих снимков, а не ошибками экспертов.

В качестве операционно-территориальных единиц для картографического отображения овражности взята ранее составленная нами векторная карта бассейнов малых рек. На территории выделено 1674 бассейна. Для каждого бассейна вычислялась суммарная протяженность овражной сети (м). Степень овражного расчленения территории определялась по наиболее часто используемым показателям: густоте (суммарная протяженность оврагов, отнесенная к единице площади – м/км²) и плотности (количество вершин оврагов на единицу площади – ед/км²).

Оценка динамики густоты овражной сети также выполнена с использованием бассейнового подхода. Для изучения динамики густоты оврагов результаты картографирования сравнивались с ранее полученными данными по овражности этой территории [2].

Методика определения динамики роста оврагов по данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Определение динамики линейного и площадного развития оврагов проводилось путем совмещения каждой овражной формы на двух одновременных космических снимках, полученных за относительно короткий период (2009–2016 годы). Для дешифрирования выбирались в основном склоновые овраги, имеющие внешне хорошо выраженные признаки активного развития (четко выраженная вершина и бровка, обнаженные борта, V-образный поперечный профиль). Для работы была выбрана ГИС MapInfo. Привязка одного космического снимка (растра) осуществлялась с помощью другого снимка, по-

лученного из программы “SAS.Планета”, уже имеющего географическую привязку. После регистрации растров оцифровывались бровка и тальвег каждого оврага. Далее производилось наложение схем дешифрирования и вычислялись площадной и линейный приросты эрозионной формы [22]. На основе полученных результатов создана геопространственная база данных. По каждой овражной форме она включает такие основные показатели: географическую привязку, длину, площадь формы, линейный и площадной прирост, тип оврагов. Погрешность совмещения минимальна, если снимки получены одной и той же или аналогичной съемочной системой, а при взаимном координировании в качестве опорных используются идентичные точки. Точность положения контуров тогда зависит от размера пиксела и точности определения пространственных координат опорных точек [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение овражного расчленения. По результатам картографирования и геоинформационной обработки данных получен векторный слой тальвегов оврагов с количественными характеристиками овражной сети. Общая протяженность овражной сети составила 666.5 км. Всего на территории идентифицировано 9142 оврага, средняя длина которых – 74 м. Преобладающее большинство оврагов – склоновые (90%). На долю техногенных оврагов приходится всего 0.3%. Склоновые овраги распространены по всей исследуемой территории, а береговые и донные в основном встречаются в бассейнах с общими высокими показателями овражной эрозии.

На территории Республики Татарстан овражная сеть в настоящее время распределяется крайне неравномерно (рис. 2, табл. 2). Густота овражной сети в среднем составляет 12 м/км², максимальное – 405 м/км², медианное и среднее квадратичное значение – 0 и 33.7 м/км² соответственно.

Изменение плотности оврагов в основном совпадает с распределением густоты, составляя в среднем 0.2 ед/км² и достигая максимума 5 ед/км². Медианное значение и среднее квадратичное отклонение – 0 и 0.45 ед/км² соответственно. Вполне закономерно, что наибольшая плотность оврагов соответствует бассейнам с высокими показателями густоты овражной сети. На карте (рис. 2, табл. 2) в подзонах южной тайги, смешанных и широколиственных лесов хорошо выделяются два основных района с наибольшей густотой оврагов: в Западном Предкамье (среднее и верхнее течение бассейнов рек Казанки и Меши) и в Предволжье (в бассейнах рек Свияги и Улемы). Лесостепные ландшафты западной части Предволжья и практически все Закамье, несмотря на

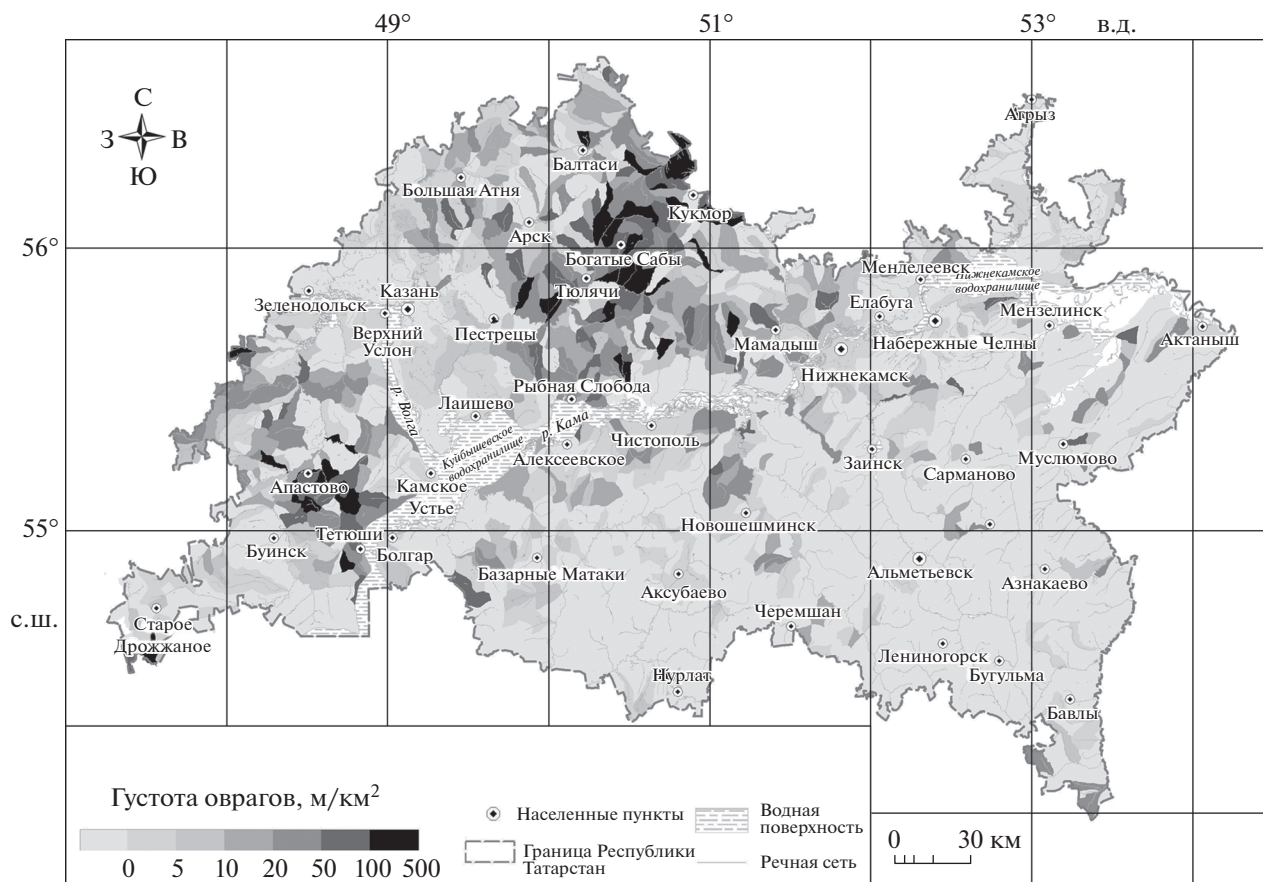


Рис. 2. Густота современной овражной сети на территории Республики Татарстан.

высокую распаханность, характеризуются либо крайне слабой заовраженностью, либо полным отсутствием оврагов.

Оценка динамики линейного и площадного роста оврагов по данным разновременных космических снимков. Всего геопространственная база данных содержит информацию по линейной и площадной динамике 304 оврагов. Средний площадной прирост склоновых оврагов выше аналогичного показателя для береговых оврагов, а средний линейный прирост выше у донных оврагов. При

разделении оврагов на сельскохозяйственные и техногенные наибольшей интенсивностью роста отличаются техногенные овраги (линейный прирост 12.3 м/год, площадной прирост 54.32 м²/год).

Сравнительный анализ полученных данных (рис. 3, а, б) показывает, что средний линейный прирост во всех районах исследования имеет близкие значения – в среднем 0.6 м/год для всей выборки. Максимальные значения среднего площадного прироста отмечены в Предволжье

Таблица 2. Распределение бассейнов по интервалам густоты оврагов

| Густота оврагов, м/км ² | Республика Татарстан | Предволжье | Предкамье | Закамье |
|------------------------------------|----------------------|------------|-----------|---------|
| 0 | 1002 | 92 | 192 | 718 |
| 0–5 | 206 | 42 | 76 | 88 |
| 5–10 | 99 | 18 | 43 | 38 |
| 10–20 | 116 | 20 | 68 | 28 |
| 20–50 | 133 | 28 | 70 | 35 |
| 50–100 | 75 | 17 | 48 | 10 |
| 100–500 | 43 | 14 | 29 | 0 |



Рис. 3. Средний линейный (а) и площадной (б) прирост активных оврагов в разных физико-географических районах.

(32.4 м²/год), а минимальные значения этого показателя – в Предкамье (19.2 м²/год). Средний площадной прирост для всех оврагов 26 м²/год. Поскольку вариабельность длин и площадей оврагов очень высока, были определены доли площадного и линейного прироста оврагов склонового и берегового типов относительно их первоначальных форм. Так, за рассматриваемый период 11 лет для склоновых оврагов площадной и линейный прирост составил 8 и 3%, а для береговых – 16 и 8% соответственно. В среднем по всей выборке эти соотношения составили 9% по площади и 4% по линейному приросту. Полученные значения свидетельствуют о слабом регрессивном линейном росте оврагов и активной переработке их бортов. То есть даже у внешне активных овражных форм наблюдается четко выраженная тенденция к их переходу в состояние динамического равновесия и стабилизации.

Таким образом, можно сделать предположение о том, что большая часть овражных форм при современных климатических условиях достигла пика интенсивности своего развития. В настоящее время большинство оврагов неактивно и происходит их постепенная трансформация в балки.

Пространственно-временная динамика густоты овражной сети. Для ее оценки результаты совре-

менного картографирования сравнивались с результатами, полученными ранее при дешифрировании оврагов по аэрофотоснимкам 1960–1970-х годов. Результаты сравнения показателей густоты овражного расчленения свидетельствуют о существенном сокращении овражности. Полученные различия в густоте оврагов за разные периоды времени отчасти могут быть обусловлены и методическими ошибками. Поскольку исходные данные не сохранились, то можно предположить, что самой распространенной ошибкой на старой карте овражности (1960–1970-х годов) было нередкое причисление к овражным формам крупных промоин и балок. Это привело к несколько завышенным показателям густоты оврагов на тот временной период.

Пространственное распределение показателя густоты оврагов по бассейнам Республики Татарстан в 60–70-х годах XX века характеризуется значительно более высокими показателями овражности. Сравнение карт густоты овражного расчленения за исследуемый временной период (рис. 2, 4) свидетельствует о повсеместном сокращении густоты оврагов, как минимум, на порядок, которая в среднем уменьшилась на 230 м/км². Происходит заметное затухание оврагообразования. На общем фоне сокращения овражности лишь в некоторых бассейнах сохранилась положительная динамика, т.е. появились новые овраги (рис. 4).

Выявленная закономерность сокращения овражности на территории исследования наблюдается также и во многих регионах европейской части России [25]. Но причины этого явления по-прежнему дискуссионные. В ряду факторов, вызывающих снижение темпов склоновой эрозии и овражной, в частности, в лесной и лесостепной зоне, отмечается роль произошедших за последние десятилетия изменений в климатической системе и в структуре землепользования. В первую очередь это связывается с увеличением в структуре севооборотов многолетних трав, сокращением пахотных земель и доли талого стока [26].

Так, минимальные значения густоты оврагов в настоящее время соответствуют бассейнам с высокими показателями залуженности территории. Активное залужение территории наблюдается в бассейнах со значительным сокращением показателя распаханности. Самые заметные сокращения распаханности отмечаются в бассейнах, непосредственно примыкающих к рекам Волги, Камы и Вятки. Оценка изменений землепользования проводилась на территории Предволжья и частично Западного Предкамья Республики Татарстан на общей площади более 20 300 км². Здесь было выбрано 458 бассейнов. Для них по результатам выполненного дешифрирования структуры землепользования рассчитаны показатели распа-

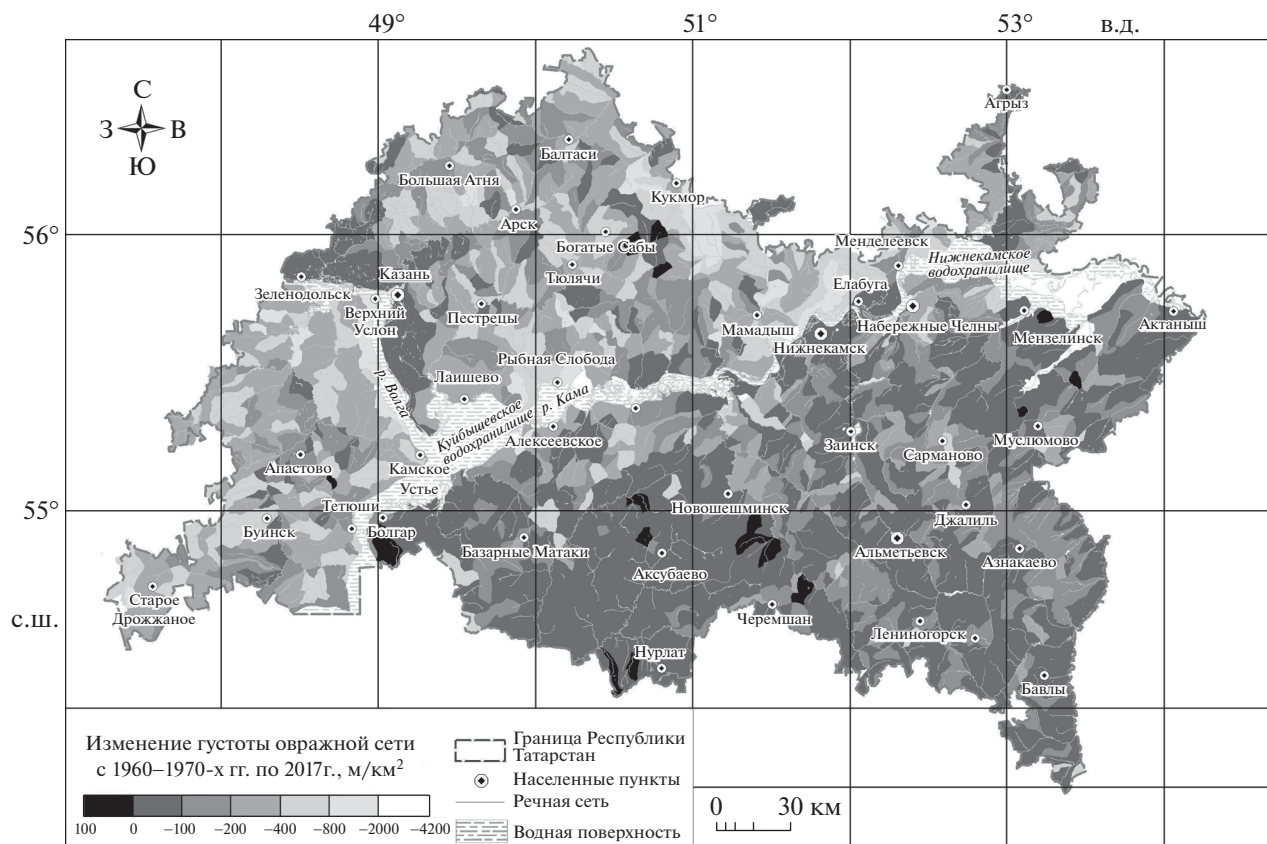


Рис. 4. Изменение густоты овражной сети с 1960–1970-х по 2017 г. на территории Республики Татарстан.

ханности, залесенности и залуженности (в %) за 2 периода (1985–1992 и 2013–2019 годы). Оценивалось изменение перечисленных показателей за рассматриваемые периоды, и анализировалась зависимость изменения густоты оврагов от изменений распаханности, залесенности и залуженности бассейнов. Проведенная оценка изменений землепользования в 2019 г. относительно 1985 г. показала сокращение площади пашни почти на 10%, увеличение доли лесов на 40.9% и сокращение доли сенокосов и пастбищ на 8.7%. В период 2003–2019 гг. для данной территории площадь пашни практически не менялась. В результате наложения тальвегов оврагов на карту землепользования (2013–2019 гг.) было отмечено, что большое количество оврагов попадает в категорию луг, также часть оврагов располагается в пределах населенных пунктов. Однако проведенный корреляционный анализ между изменением густоты овражной сети и изменениями в распаханности, залесенности и залуженности бассейнов не выявил никакой значимой связи (коэффициенты корреляции – 0.014, 0.005 и 0.003 соответственно). Возможно, что роль динамики землепользования на овражность территории становится заметна при более существенных изменениях этих параметров.

На рис. 5 представлены разновременные аэрокосмические снимки фрагментов территории, расположенных в Предкамье. Хорошо видно, что за последние 39–45 лет здесь произошло затухание овражной эрозии. Бывшие овраги различного типа, по сути, трансформировались в балочные формы. На этих фрагментах территории редуцирование оврагов произошло благодаря противоэрозионному эффекту лесных насаждений, прекращению распашки и залужению привершинной части оврагов.

На территории исследования фиксируется влияние глобального потепления климата на региональные климатические процессы. Рост глобальной приповерхностной температуры, отмечаемый по результатам наблюдений за последние 150 лет, связан с увеличением скорости ее роста в 1970–2000-е годы [15]. Наиболее значительные положительные изменения температурного режима наблюдаются в январе и феврале, приводя к увеличению средних годовых температур воздуха. Подтверждается тенденция к ослаблению суровости погодных условий зимы в целом и отдельных ее месяцев. При этом наиболее быстрыми темпами уменьшается суровость в январе [27]. Все это приводит к уменьшению глубины промерзания почвы и, как следствие, снижению показателей

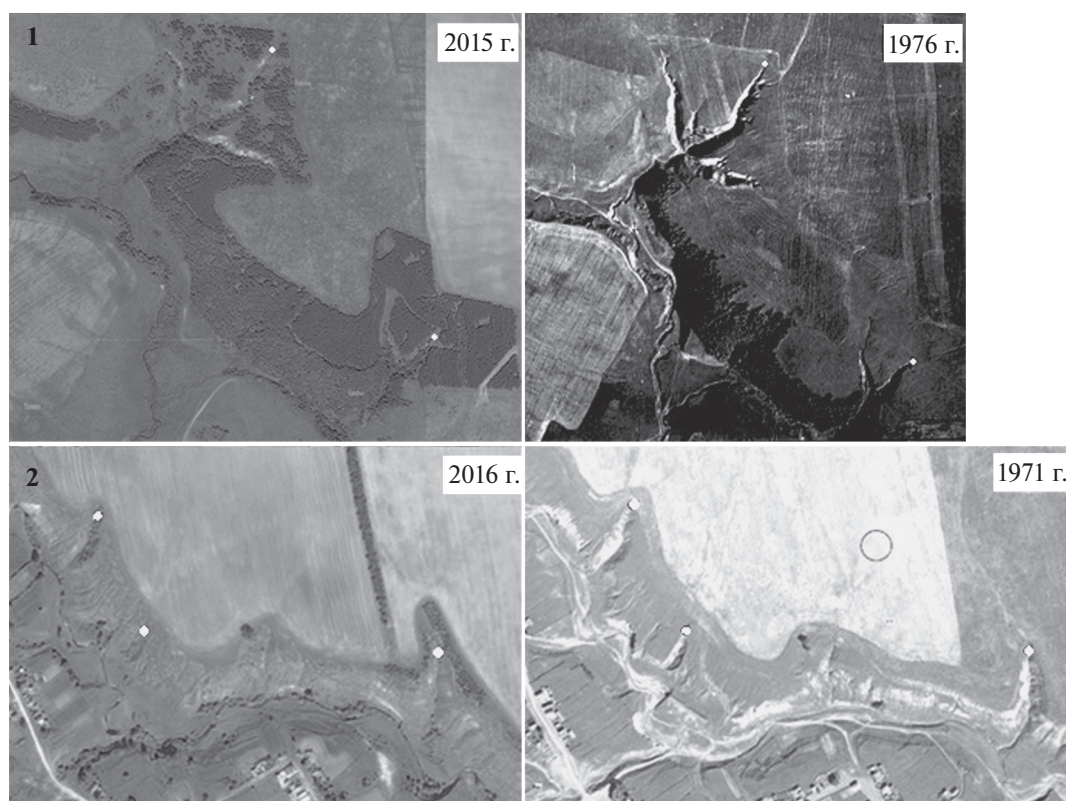


Рис. 5. Примеры затухания овражной эрозии по данным дистанционного зондирования Земли.

1 – д. Большой Сулабаш, Высокогорский район (56°09'26" с.ш., 49°17'26" в.д.); 2 – с. Малые Кирмени, Мамадышский район – (55°44'31" с.ш., 51°04'48" в.д.), Предкамье РТ.

талого стока. По данным полевого мониторинга роста оврагов на территории Удмуртии из-за глобального потепления, в частности, снижения глубины промерзания почв в зимние месяцы, значительно снизился поверхностный сток с водосборов оврагов в период весеннего снеготаяния. Это привело к снижению в 1998–2014 гг. в четыре раза темпов роста оврагов по сравнению с 1978–1997 гг. [28].

За 1955–2009 гг. количество осадков в регионе существенно изменилось [15]. Изменения носили сложный и разнонаправленный характер. С середины 1950-х и до 1970-х годов сумма осадков уменьшилась. А с 1970-х годов годовые суммы несколько увеличились за счет резкого роста осадков теплого периода. В холодный период рост сумм осадков с конца 1970-х годов и до начала XXI века составил 35 мм за 23 года, а рост количества осадков теплого периода – 48 мм за 15 лет (с середины 1970-х и до конца 1980-х годов). Таким образом, несмотря на существенное уменьшение количества осадков в конце исследуемого временного интервала, в период наиболее активных современных изменений климата количество осадков несколько выросло. В холодный период это повышение составило величину около 20 мм, в теплый – около 10 мм [15]. А годовые суммы ат-

мосферных осадков увеличились в регионе исследования на 30 мм.

В настоящее время наблюдаются увеличение подземной составляющей и сокращение поверхностной составляющей склонового стока, основная часть которой приходится на период половодья [29]. Так, например, в южной части лесной зоны Русской равнины вклад средневзвешенного, поверхностного склонового стока снизился в среднем в 1.5 раза, в лесостепной зоне в 2.4 раза. Повсеместно возросла доля стока инфильтрационного происхождения [30]. Понижение доли весеннего стока фиксируется для большей части бассейна р. Камы (на 10%) [31]. Об уменьшении поверхностного стока и смыва с пахотных земель за последние 30 лет также свидетельствует сокращение темпов аккумуляции наносов в днищах балок в различных частях южной половины европейской части России. Так, например, в бассейне реки Мешы (Предкамье) темпы аккумуляции сократились более, чем в 4 раза [32]. Таким образом, снижение темпов эрозии за последние 30–40 лет связано не только с заброшенностью земель и последующим зарастанием пашни, но и с определенными климатическими тенденциями: уменьшение глубины промерзания почвы и сокращение поверхностного склонового стока в период

весеннего снеготаяния [33]. Затуханию процесса овражной эрозии также способствует посадка защитных лесополос, проведенная на территории в середине прошлого века. Отметим также, что в звене линейной эрозии на склонах бассейнов происходят разнонаправленные тенденции: сокращение активности овражной эрозии и продолжающийся рост звена струйчатой (промоинной) эрозии на пашне. Дешифрирование струйчатых размывов, проведенное на 70 ключевых участках по космическим снимкам “Landsat” за 1984–2017 гг. на пашне в лесной, лесостепной и степной зонах востока Русской равнины показало, что за этот период в направлении от юга лесной подзоны к лесостепным и степным ландшафтам наблюдается резкое увеличение как плотности, так и густоты сети промоин: в среднем в 4.6 и 10 раз соответственно. Продвижение пояса струйчатой эрозии идет в сторону водораздела за счет образования новых размывов в верхних частях промоинной сети и ее удлинения, при этом наблюдается заметное сокращение ширины эрозионно слабо активного пояса – микроручейковой эрозии [34].

На этом фоне, на наш взгляд, при современных климатических условиях определяющим фактором уменьшения овражности территории является естественная эволюция этих линейных форм эрозии. То есть завершение активной фазы их развития, пришедшейся на середину прошлого столетия, и постепенная трансформация оврагов в балки.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования по современному расчленению и динамике овражной сети в лесных и лесостепных ландшафтах востока европейской части России с использованием материалов космических съемок и гис-технологий позволили установить пространственно-временные закономерности их развития. Впервые для этой территории создан геоинформационный слой овражной сети, позволяющий в дальнейшем проводить мониторинг оврагов. Сравнение карты современной густоты овражного расчленения с аналогичной картой, составленной более полувека назад, свидетельствует о масштабном сокращении густоты (на порядок) по всей территории. Этот регион, справедливо ранее считавшийся “эрозионным полюсом” России, утратил этот печальный статус. Если в 1960–1970-х годы основной фон густоты оврагов был 100–500 м/км² (сильное расчленение), то на составленной по той же методике карте современных оврагов доминируют бассейны, имеющие овражность менее 10 м/км². В лесной зоне еще сохраняются ареалы умеренного (20–50 м/км²) и значительного (50–100 м/км²) овражно-расчленения, в то время как в лесостепной зоне

преобладают территории со спорадическим и очень слабым распространением оврагов. Самое существенное сокращение густоты оврагов по их абсолютным значениям наблюдается в лесных ландшафтах Предволжья и в ряде бассейнов (рек Казанки и Вятки) Предкамья. В лесостепной зоне Закамья на фоне ранее незначительных показателей овражности сейчас доминируют бассейны, где овраги либо уже не встречаются, либо есть только единичные формы. Исследования линейной и площадной динамики за последние 11 лет более 300 оврагов, имеющих на космических снимках высокого и сверхвысокого разрешения признаки активных форм, также позволяют сделать вывод о постепенном затухании овражной эрозии. Наиболее часто упоминаемые причины подобных принципиальных трансформаций в звене склоновой линейной эрозии – это произошедшие после распада Советского Союза изменения в структуре землепользования и севооборота, а также в климатической системе. На наш взгляд, они еще требуют своего подтверждения и достаточно дискуссионные. Ключевым фактором существенного сокращения овражной сети является эволюционный. Достигнув пика своего активного развития и состояния динамического равновесия в середине XX века, овраги переходят в балочную стадию. А изменения в землепользовании и в климате (значительное уменьшение талого стока) выступили своеобразными триггерами трансформации склоновой флювиальной системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-17-00064).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедков А.П. Экзогенное рельефообразование в Казанско-Ульяновском Поволжье. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1970. 256 с.
2. Овражная эрозия востока Русской равнины / Науч. ред. А.П. Дедков. Казань: Казанский ун-т, 1990. 140 с.
3. Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Fernando J., Bezerra R., Bolysov S., Dvinskih A., Frankl A., Fuseina Y., Guerra A., Haregeweyn N., Ionita I., Imwangana F., Moeyersons J., Moshe I., Samani A., Niacsu L., Nyssen J., Otsuki Y., Radoane M., Rysin I., Ryzhov Y., 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>
4. Seginer I. Gully development and sediment yield // *Journal of Hydrology*. 1966. No. 4. P. 236–253. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(66\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(66)90082-5)
5. Blong R.J., Graham O.P., and Veness J.A. The role of sidewall processes in gully development // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1982. No. 7. P. 381–385.

6. *Ohmori H., Speight J.G., and Takeuchi K.* Stratigraphic background of gully development of the Pekina catchment in the Mt. Lofty ranges, South Australia // *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*. 1986. No. 21. P. 65–84.
7. *Smith B.J.* Effects of climate and land-use change on gully development: an example from northern Nigeria // *Zeitschrift für Geomorphologie*. 1982. No. 44. P. 33–51.
8. *Ionita I.* Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // *Catena*. 2006. No. 68. P. 133–140.
9. *Ghimire S.K., Higaki D., and Bhattarai T.* Gully erosion in the Siwalik Hills, Nepal: estimation of sediment production from active ephemeral gullies // *Earth Surf. Process. Landf.* 2006. 31. P. 155–165.
10. *Castillo C. and Gómez J.A.* A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches // *Earth-Science Reviews*. No. 160. 2016. P. 300–319. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
11. *Рыжов Ю.В.* Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: ГЕО, 2015. 180 с.
12. *Зайцева М.Ю., Рысин И.И.* Влияние геолого-геоморфологических факторов на рост оврагов в Удмуртии // *Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле*. 2017. Т. 27. Вып. 1. С. 87–97.
13. *Gafurov A.M. and Yermolayev O.P.* Automatic Gully Detection: Neural Networks and Computer Vision // *Remote Sensing*. 2020. No. 12. P. 1743. <https://doi.org/10.3390/rs12111743>
14. *Chen Y., Jiao J., Wei Y., Zhao H., Yu W., Cao B., Xu H., Yan F., Wu D., and Li H.* Accuracy assessment of the planar morphology of valley bank gullies extracted with high resolution remote sensing imagery on the Loess Plateau // *Int. J. Environ. Res. Public Health, China*. 2019. No. 16. 369 p. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030369>
15. *Переведенцев Ю.П., Верещагин М.А., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Соколов В.В.* Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа / *Науч. ред. Ю.П. Переведенцев*. Казань: Казан. ун-т, 2013. 300 с.
16. *Ермолаев О.П., Игонин М.Е., Бубнов А.Ю., Павлова С.В.* Ландшафты Республики Татарстан. Региональный ландшафтно-экологический анализ / *Ред. О.П. Ермолаев*. Казань: Слово, 2007. 411 с.
17. Речные бассейны Европейской части России. <http://bassepr.kpfu.ru/>
18. Зеленая книга Республики Татарстан / *Мин-во охраны окружающей среды и природных ресурсов РТ, Эколог. фонд Респ. Татарстан / Глав. ред. Н.П. Торсуев*. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1993. 422с.
19. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан (2011–2019 гг.). <https://eco.tatarstan.ru/gosdoklad.htm>.
20. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Каравалева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
21. *Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г.* География динамики земледельческой эрозии почв на европейской территории России // *Почвоведение*. 2017. № 11. С. 1390–1400.
22. *Yermolayev O.P., Rysin I.I., and Golosov V.N.* Mapping assessment of gully erosion in the east of the Russian plain // *Geomorphology*. 2017. No. 2. P. 38–51.
23. *Ермолаев О.П., Медведева Р.А., Платончева Е.В.* Методические подходы к мониторингу процессов эрозии на сельскохозяйственных землях Европейской части России с помощью материалов космических съемок // *Уч. зап. Казанск. ун-та*. 2017. Т. 159. № 4. С. 668–680.
24. *Лабутина И.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков. Уч. пособие для студентов вузов М.: Аспект Пресс, 2004. 184 с.
25. *Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П.* Влияние антропогенных факторов и их изменений в различных ландшафтных зонах на изменения темпов смыва почв за последние 30 лет // *Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / Ред. В.Н. Голосов, О.П. Ермолаев*. Казань: Изд-во АН РТ, 2019. С. 254–257.
26. *Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., and Safina G.* Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain // *Land Degradation and Development*. 2018. Vol. 29. No. 8. P. 2658–2667.
27. *Гоголь Ф.В.* Динамика центров действия атмосферы первого естественного синоптического района и их влияния на изменения климата Республики Татарстан в зимнее время. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань: Казанский ун-т, 2010. 27 с.
28. *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. 90–102.
29. *Сафина Г.Р., Голосов В.Н.* Изменения внутригодового распределения стока малых рек южной половины Европейской части России в связи с изменениями климата // *Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*. 2018. Т. 160. Кн. 1. С. 111–125.
30. *Коронкевич Н.И., Долгов С.В.* О гидрологической роли рельефа в южной части Русской равнины // *Геоморфология*. 2019. № 3. С. 46–56. <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019346-56>
31. *Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С.* Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // *Водное хозяйство России*. 2015. № 4. С. 4–20.
32. *Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Гусаров А.В., Шарифуллин А.Г.* Оценка тренда деградации пахотных почв на основе изучения темпов формирования стратоземов с использованием ¹³⁷Cs в качестве хрономаркера // *Почвоведение*. 2017. № 10. С. 1–15.
33. *Tsymbarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., and Andreeva O.* Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia // *International Soil and Water Conservation Research*. Vol. 8 (4). P. 418–429.
34. *Platoncheva E., Yermolaev O., and Essuman-Quainoo B.* Spatial-Temporal Dynamics of the Ephemeral Gully Belt on the Plowed Slopes of River Basins in Natural and Anthropogenic Landscapes of the East of the Russian Plain // *Geosciences*. 2020. No. 10 (5). 167. P. 17. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050167>

Modern gully erosion in forest and forest-steppe landscapes of the east of the Russian Plain

O. P. Yermolaev^{a,#}, R. A. Medvedeva^a, and M. A. Ivanov^a

^a Kazan Federal University, Kazan, Russia

[#]E-mail: oyermol@gmail.com

The spatial and temporal assessment of modern gully erosion was carried out for a large region (more than 68000 km²) of the eastern Russian Plain located at the intersection of forest (subzones of southern taiga, mixed and broad-leaved forests) and forest-steppe landforms within the Republic of Tatarstan. The choice of the territory was caused by the high density of gullies established more than half a century ago, as well as by the availability of multi-temporal cartographic data about the gully network density obtained using a unified methodology. The current gully density was determined by visual interpretation of high and ultra-high resolution satellite images for 2010–2017. A geospatial database was created. For this purpose the system of interpretation features of gully forms was developed. Gully maps were developed based on their talweg type using slope, bank, and bottom characteristics as criteria. Two indicators were used to quantify gully erosion: total length per unit area and density of the gully network, where the basin approach was used as an operational territorial unit. Created geo database compiles gullies characteristics for 1674 basins. A total of 9142 gullies were identified in the study area with an average length of 74 meters. The density of the gully network is currently distributed irregularly over the area and averages 12 m/km², reaching a maximum of 405 m/km². The change in the number of gullies spatially coincides with the distribution of the density of the gully network, being on average 0.2 units/km², the maximum being 5 units/km². Among morpho-genetic types, slope gullies dominate (90%), with bank and bottom gullies representing 7% and 3%, respectively. The temporal dynamics of the areal shape and linear growth of active gullies mainly of the slope type was determined by combining each gully shape on two multi-temporal satellite images obtained over a relatively short period (2009–2016). The dynamics were determined for 304 gullies. The average linear growth of gullies is 0.6 m/year, and the average areal growth is 28 m²/year. The spatial and temporal dynamics of the gully density in the river basins was determined by comparing the data of mapping of the modern gully network with the results obtained by mapping gullies on aerial photographs of 1960–1970s. Overall, a significant decrease in gully density, indicating the slowing down of gully formation processes, was established. The average density of the gully network in all the basins decreased by 230 m/km² in the study area. Against the background of the general reduction, only in some basins there was a slight increase in gully density. Minimum values of gully density now correlate with the basins with high indices of grassing of the territory. Changes in hydro-climatic conditions (increased winter temperatures, reduced depth of soil freezing and surface snowmelt runoff), reduction in plowed area, gully evolution (transformation from gully to balka stage), planting of protective forest belts has determined the decreasing trend of gully development in the study area.

Keywords: gully, talweg, gully network, satellite images, linear growth, areal growth

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation (No. 19-17-00064).

REFERENCES

1. Dedkov A.P. *Ekzogennoe rel'efoobrazovanie v Kazansko-Ulyanovskom Povolzh'e* (Exogenous relief formation in the Kazan-Ulyanovsk Volga region). Kazan: Izd-vo KGU (Publ.), 1970. 256 p. (in Russ.)
2. *Ovrazhnaya eroziya vostoka Russkoi ravniny* (Gully erosion of the East of the Russian Plain). A.P. Dedkov (Ed.). Kazan.: Izd-vo KGU (Publ.), 1970. 140 p. (in Russ.)
3. Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Fernando J., Bezerra R., Bolysov S., Dvinskih A., Frankl A., Fuseina Y., Guerra A., Haregeweyn N., Ionita I., Imwangana F., Moeyersons J., Moshe I., Samani A., Niacsu L., Nyssen J., Otsuki Y., Radoane M., Rysin I., Ryzhov Y., 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>.
4. Seginer I. Gully development and sediment yield. *Journal of Hydrology*. 1966. No. 4. P. 236–253. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(66\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(66)90082-5).
5. Blong R.J., Graham O.P., and Veness J.A. The role of sidewall processes in gully development. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1982. No. 7. P. 381–85.
6. Ohmori H., Speight J.G., and Takeuchi K. Stratigraphic background of gully development of the Pekina catchment in the Mt. Lofty ranges, South Australia. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*. 1986. No. 21. P. 65–84.
7. Smith B.J. Effects of climate and land-use change on gully development: an example from northern Nigeria. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 1982. No. 44. P. 33–51.
8. Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *Catena*. 2006. No. 68. P. 133–140.
9. Ghimire S.K., Higaki D., and Bhattarai T. Gully erosion in the Siwalik Hills, Nepal: estimation of sediment production from active ephemeral gullies. *Earth Surf. Process. Landf.* 2006. 31. P. 155–165.

10. Castillo C. and Gómez J.A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*. No. 160. 2016. P. 300–319. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>.
11. 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.)
12. Zaitseva M.Yu. and Rysin I.I. *Vliyanie geologo-geomorfologicheskikh faktorov na rost ovragov v Udmurtii* (Influence of geological and geomorphological factors on the growth of ravines in Udmurtia). *Vestn. Udmurt. un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2017. Vol. 27 (1). P. 87–97. (in Russ.)
13. Gafurov A.M. and Yermolayev O.P. Automatic Gully Detection: Neural Networks and Computer Vision. *Remote Sensing*. 2020. No. 12. P. 1743. <https://doi.org/10.3390/rs12111743>.
14. Chen Y., Jiao J., Wei Y., Zhao H., Yu W., Cao B., Xu H., Yan F., Wu D., and Li H. Accuracy assessment of the planar morphology of valley bank gullies extracted with high resolution remote sensing imagery on the Loess Plateau. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. China. 2019. No. 16. 369 p. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030369>.
15. Perevedentsev Yu.P., Vereshchagin M.A., Shantalskii K.M., Naumov E.P., and Sokolov V.V. *Klimat i okruzhayushchaya sreda Privolzhskogo federal'nogo okruga* (Climate and environment of the Volga Federal District). M.A. Vereshchagin (Ed.). Kazan: KFU (Publ.), 2013. 274 p. (in Russ.)
16. Ermolaev O.P., Igonin M.E., Bubnov A.Yu., and Pavlova S.V. *Landshafty Respubliki Tatarstan. Regional'nyi landshaftno-ekologicheskii analiz* (Landscapes of the Republic of Tatarstan. Regional landscape and environmental analysis). O. P. Ermolaev (Ed.). Kazan: Slovo (Publ.), 2007. 411 p. (in Russ.)
17. *Rechnye basseiny Evropeiskoi chasti Rossii* (River basins of the European part of Russia). <http://bassepr.kpfu.ru/> (in Russ.)
18. *Zelenaya kniga Respubliki Tatarstan* (Green Book of the Republic of Tatarstan). *Min-vo okhrany okruzhayushchei sredy i prirodnikh resursov RT, Ekolog.fond Resp. Tatarstan* (Ministry of Environmental Protection and Nature resources of the Rep. Tatarstan, Ecol. fund of the Republic of Tatarstan). N.P. Torsuev (Ed.). Kazan: Izd-vo KGU (Publ.), 1993. 420 p. (in Russ.)
19. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii prirodnikh resursov i ob okhrane okruzhayushchei sredy Respubliki Tatarstan (2011–2019)* (State Report on the situation of natural resources and environmental Protection of the Republic of Tatarstan). <https://eco.tatarstan.ru/gosdoklad.htm>. (in Russ.)
20. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., and Nefedova T.G. *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v KhKh veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* (Dynamics of Agricultural Lands in Russia in XX Century and Postagrogenic Restoration of Vegetation and Soils). Moscow: GEOS (Publ.), 2010. 416 p. (in Russ.)
21. Litvin L.F., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., and Dobrovolskaya N.G. *Geografiya dinamiki zemledel'cheskoi erozii pochv na evropeiskoi territorii Rossii* (Geography of dynamics of agricultural soil erosion in the European territory of Russia). *Eurasian Soil Science*. 2017. No. 11. P. 1390–1400. (in Russ.)
22. Yermolayev O.P., Rysin I.I., and Golosov V.N. Mapping assessment of gully erosion in the east of the Russian plain. *Geomorphology*. 2017. No. 2. P. 38–51. (in Russ.)
23. Ermolaev O.P., Medvedeva R.A., and Platoncheva E.V. *Metodicheskie podkhody k monitoringu protsessov erozii na sel'skokhozyaistvennykh zemlyakh Evropeiskoi chasti Rossii s pomoshch'yu materialov kosmicheskikh s"emok* (Methodological approaches to the monitoring of erosion processes on agricultural lands of the European part of Russia using satellite imagery). *Uch. zap. Kazansk. un-ta*. 2017. Vol. 159. No. 4. P. 668–680. (in Russ.)
24. Labutina I.A. *Deshifrirovaniye aerokosmicheskikh snimkov* (Interpretation of Satellite Images). Moscow: Aspect Press (Publ.), 2004. 184 p. (in Russ.)
25. Litvin L.F. and Kiryukhina Z.P. *Vliyanie antropogennykh faktorov i ikh izmenenii v razlichnykh landshaftnykh zonakh na izmeneniya tempov smyva pochv za poslednie 30 let* (Influence of anthropogenic factors and their changes in various landscape zones on changes in the rate of soil flushing over the past 30 years). *Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti razvitiya sovremennykh protsessov prirodno-antropogennoi erozii na Russkoi ravnine* (Spatial and temporal patterns of development of modern processes of natural and anthropogenic erosion on the Russian plain). V.N. Golosov, O.P. Ermolaev (Eds.). Kazan: Izd-vo AN RT (Publ.), 2019. P. 254–257. (in Russ.)
26. Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., and Safina G. Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain. *Land Degradation and Development*. 2018. Vol. 29. No. 8. P. 2658–2667.
27. Gogol' F.V. *Dinamika tse ntrov deistviya atmosfery pervogo estestvennogo sinopticheskogo raiona i ikh vliyaniya na izmeneniya klimata Respubliki Tatarstan v zimnee vremya* (Dynamics of the atmospheric action centers of the first natural synoptic region and their influence on climate changes in the Republic of Tatarstan in winter). PhD thesis. Kazan: Izd-vo KGU (Publ.), 2010. 27 p. (in Russ.)
28. Rysin I.I., Golosov V.N., Grigor'ev I.I., and Zaitseva M.Yu. *Vliyanie izmenenii klimata na dinamiku tempov rosta ovragov Vyatsko-Kamskogo mezhdurech'ya* (Influence of climate changes on the dynamics of growth rates of ravines in the Vyatka-Kama interfluves). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 1. P. 90–102. (in Russ.)
29. Safina G.R. and Golosov V.N. *Izmeneniya vnutrigodovogo raspredeleniya stoka malyykh rek yuzhnoi poloviny Evropeiskoi chasti Rossii v svyazi s izmeneniyami klimata* (Changes in the intra-annual distribution of the flow of small rivers in the southern half of the European part of Russia in connection with climate changes). *Uch. zap. Kazan.un-ta*. 2018. Vol. 160 (1). P. 111–125. (in Russ.)
30. Koronkevich N.I. and Dolgov S.V. *O gidrologicheskoi roli rel'efa v yuzhnoi chasti Russkoi ravniny* (On the hydrological role of relief in the southern part of the Russian plain). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*.

2019. No. 3. P. 46–56. (in Russ.)
<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019346-56>
31. Frolova N.L., Kireeva M.B., Agafonova S.A., Evstigneev V.M., Efremova N.A., and Povalishnikova E.S. *Vnutrigodovoe raspredelenie stoka ravninnykh rek Evropeiskoi territorii Rossii i ego izmenenie* (Intra-annual distribution of flow of lowland rivers of the European territory of Russia and its change). *Water management of Russia*. 2015. No. 4. P. 4–20. (in Russ.)
32. Golosov V.N., Ivanova N.N., Gusarov A.V., and Sharifullin A.G. *Otsenka trenda degradatsii pakhotnykh pochv na osnove izucheniya tempov formirovaniya stratozemov s ispol'zovaniem ^{137}Cs v kachestve khronomarkera* (Assessment of the trend of degradation of arable soils based on the study of the rate of stratozem formation using ^{137}Cs as a chronomarker). *Eurasian Soil Science*. 2017. No. 10. P. 1–15. (in Russ.)
33. Tsymbarovich P., Kust G., Kumani M., Golosov V., and Andreeva O. Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia. *International Soil and Water Conservation Research*. Vol. 8 (4). P. 418–429.
34. Platoncheva E., Yermolaev O., and Essuman-Quainoo B. Spatial-Temporal Dynamics of the Ephemeral Gully Belt on the Plowed Slopes of River Basins in Natural and Anthropogenic Landscapes of the East of the Russian Plain. *Geosciences*. 2020. No. 10 (5). 167. P. 17.
<https://doi.org/10.3390/geosciences10050167>