

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОВРАЖНОЙ СЕТИ (НА ПРИМЕРЕ ЛАНДШАФТОВ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

© 2022 г. Р. А. Медведева^а, *, О. П. Ермолаев^а, **

^аКазанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: gregina8@mail.ru

**E-mail: oyermol@gmail.com

Поступила в редакцию 24.10.2022 г.

После доработки 22.11.2022 г.

Принята к публикации 02.12.2022 г.

Овражная эрозия является экстремальным проявлением деятельности временных водных потоков на склонах и относится к категории экзогенных природных опасностей. Оценка современного овражного расчленения в области интенсивного земледелия России – степной зоне – актуальная задача. Она может быть решена путем гис-картографирования по данным ДЗЗ высокого разрешения. Геоинформационное картографирование оврагов и пространственно-временная оценка проведена в пределах крупного региона страны – Саратовской области (100.2 тыс. км²). Выбор территории исследования обусловлен доминированием степных ландшафтов и отсутствием данных о современном овражном расчленении. Для оценки овражности проведено сплошное визуальное дешифрирование территории, а для картографического отображения результатов применен бассейновый подход (704 бассейна малых рек). По сформированной системе дешифровочных признаков овражных форм выделены тальвеги оврагов, для территории исследования создан векторный слой, содержащий 17628 линейных объектов, а также проведена классификация оврагов на склоновые, береговые и донные типы. Суммарная протяженность овражной сети на территории Саратовской области составила 1612 км, где средняя длина оврага – 92 м. Преобладающее большинство оврагов (88%) относится к склоновому типу. Более 80% от общей площади территории области характеризуется слабым овражным расчленением и его отсутствием в том числе. Максимальные значения густоты оврагов (до 443 м/км²) отмечаются в речных бассейнах Правобережья Саратовской области, минимальные (более 0 до 5 м/км²) – в Заволжье. Пространственное распределение плотности оврагов (среднее значение 0.2 ед/км², максимальное – 5.2 ед/км²) соответствует распределению показателя густоты оврагов. Методом корреляционного анализа определена связь между показателями густоты оврагов и средней крутизной склонов. Узкие и длинные овраги в меловых отложениях, имеющие незадернованные склоны, но находящиеся в “законсервированном” состоянии без следов активного роста, представляют особенность эрозионной сети Саратовской области. Из-за широких участков между ними, занятыми лугами, фиксируется прямая связь между залуженностью территории и густотой оврагов. В Саратовской области идентифицированы районы с экстремально высокой пораженностью склонов оврагами и развитием “бедлендов”. Они расположены в пределах Приволжской возвышенности и развиты на меловых отложениях с высокой крутизной склонов и низкой залесенностью.

Ключевые слова: овраг, овражная сеть, густота оврагов, плотность оврагов, геоинформационное картографирование

DOI: 10.31857/S086960712205007X

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования определяется важнейшей ролью процессов эрозии в деградации почвенного покрова, приводящей к снижению плодородия обрабатываемых земель нашей страны. Природно-антропогенная эрозия на склонах представляет собой сложный парагенетический комплекс. От водораздела к днищу долины закономерно трансформируются не только сам поверхностный склоновый сток и создаваемые им морфологические формы флювиального микро- и мезорельефа, но также изменяется интенсивность смыва и аккумуляции материала. В средней и нижней частях склонов такая трансформация приводит к возникновению разнообразных форм линейной эрозии, в том числе наиболее морфологически выраженных форм — оврагов. Овраги свидетельствуют о максимально опасном проявлении эрозии на склонах. В области линейного размыва полностью уничтожается почвенный покров. Кроме того, сами овраги выступают участками транзита почвенно-грунтового материала и загрязнителей, поступающих из выше расположенных участков склона, доставляя эти наносы в пойменно-террасовые комплексы долин и непосредственно в реки.

Картографирование и пространственно-временная оценка овражной эрозии в настоящее время является актуальной в связи с произошедшими за последние 50 лет изменениями как природного (в первую очередь климатических условий), так и антропогенного (землепользование) фона, во многом определяющих формирование и развитие овражных форм. Кроме того, предыдущие оценки овражности сделаны несколько десятилетий назад и требуют уточнения об интенсивности и направленности процесса в настоящее время. Результаты оценки могут стать основой для разработки мер по снижению негативных последствий в настоящем или по предотвращению будущего ущерба сельскохозяйственным угодьям исследуемой территории.

Картографирование современной овражной эрозии на основе полевых методов с использованием данных дистанционного зондирования проведены во многих регионах мира [23, 25, 29, 30, 33, 36–38]. Тем не менее, в региональном масштабе в европейской части континента картографирование оврагов проведено только лишь в ряде стран [39]. Такие исследования в разное время были сделаны в Словакии [24], Польше [29, 31], Румынии [35], Франции [26] и Венгрии [32]. Пространственное развитие современных оврагов с использованием данных дистанционного зондирования в России изучалось в большом регионе Среднего Поволжья (более 170 000 км²) [3–5, 13, 28], на юге Восточной Сибири [15].

Цель исследования — крупномасштабное геоинформационное картографирование и пространственно-временная оценка современной овражной эрозии в степных природно-антропогенных ландшафтах на примере Саратовской области. Выбор территории обусловлен тем, что почти 80% от области находится в степной зоне, более 86% от общей площади региона — это земли сельскохозяйственного назначения, которые давно и интенсивно сельскохозяйственно освоены. На основе бассейнового подхода проведено картографирование тальвегов современных оврагов с созданием геобазы данных по ним и тематических карт густоты и плотности для этого крупного региона степной зоны России.

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Саратовская область расположена на юго-востоке Восточно-Европейской равнины в северной части Нижнего Поволжья, граничит на юге с Волгоградской областью, на западе с Воронежской и Тамбовской областями, на севере — с Пензенской, Самарской, Ульяновской областями; на востоке проходит государственная граница России с Казахстаном. Регион находится в нескольких ландшафтных зонах: степной и, частично, лесостепной и полупустынной (рис. 1), занимая территорию 100,2 тыс. км².

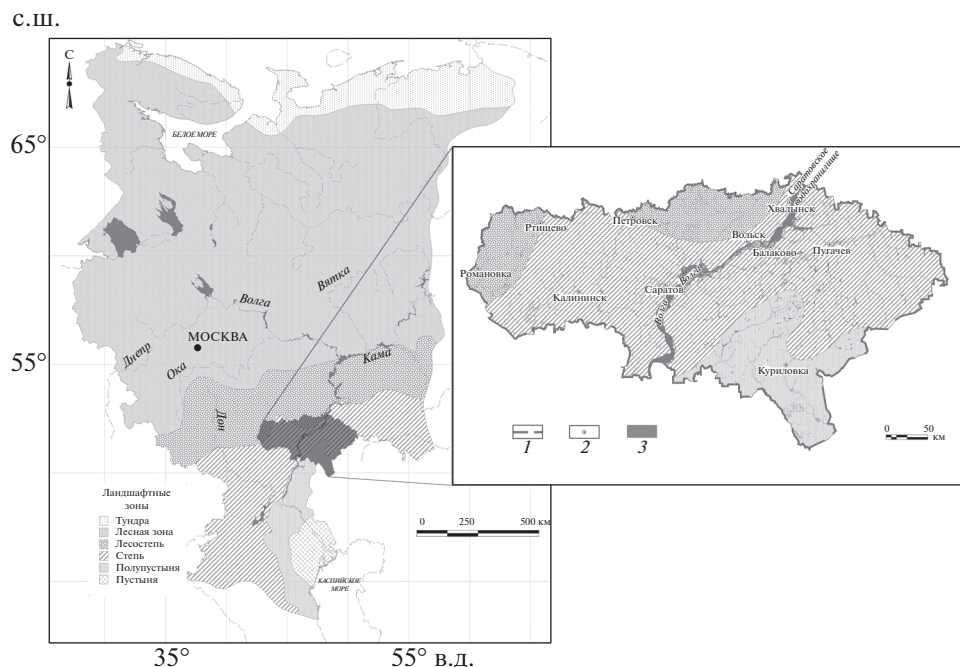


Рис. 1. Район исследования. 1 — граница Саратовской области, 2 — населенные пункты, 3 — водные объекты.

Fig. 1. The location of the study area. 1—the border of the Saratov region, 2—settlements, 3—water objects.

Река Волга условно делит область на две части: Правобережье и Заволжье. Отмечаются различия между этими частями в том, что в Заволжье, за исключением отдельных небольших участков, на крайнем востоке по южным отрогам Общего Сырта, по высоте не превышает 150–160 м над уровнем моря, а преобладающими высотами являются 80–110 м [18]. Западная часть области расположена по правую сторону реки Волги, на Приволжской возвышенности и имеет общий фон высот более 150 м.

Геологическое и тектоническое строение обусловлено ее положением на Русской платформе (ее юго-восточной части). Вдоль волжского Правобережья с севера на юг протягивается Ульяновско-Саратовский прогиб, наиболее глубокий участок которого расположен в верхнем течении р. Медведицы (Петровская котловина). На юге прослеживается зона Доно-Медведицких поднятий. В геологическом строении принимают участие четвертичные, палеогеновые, меловые, юрские, каменноугольные и девонские отложения.

Климат умеренно континентальный. Средняя июльская температура воздуха повышается с 20,8°C на севере Правобережья до 24°C на юго-востоке Заволжья. Средняя температура в январе изменяется от –9°C на юго-западе Правобережья до –11°C на северо-востоке Заволжья [12]. Годовая сумма осадков 393 мм (табл. 1).

По направлению с северо-запада на юго-восток наблюдается четко выраженный переход от районов слабо засушливых к районам с острым дефицитом влаги. В этом же направлении типичные черноземами сменяются каштановыми почвами и солончаками. К особенностям климата можно отнести частую повторяемость засух и засуховеев. За последние 100 лет повторяемость засух в период весенне-летней вегетации составила в среднем 46% [14].

Таблица 1. Природно-антропогенные условия развития оврагов в бассейнах Саратовской области [41]**Table 1.** Natural and anthropogenic conditions for the gully development in the basins of the Saratov region [41]

Средняя высота, м	129
Средняя крутизна склонов, град.	1.22
Длины линий тока, м	638
Эрозионный потенциал рельефа на пашне (LS-фактор)	0.279
Эрозионный потенциал осадков на пашне, (МДж мм)/(га час) в год (1991–2019 гг.)	285.3
Противоэрозионный фактор растительного покрова на пашне (С-фактор)	0.455
Средняя годовая температура воздуха (град. С) (1960–2014 гг.)	5.9
Среднее годовое количество осадков в бассейне, мм	393
Среднее количество осадков за холодный период года, мм	128
Среднее количество осадков за теплый период года, мм	265
Запасы воды в снеге, мм (2006–2019 гг.)	81.76
Модуль стока воды (куб. м/(сек. кв. км) (весь период наблюдений)	0.002
Годовой слой стока воды (мм) (весь период наблюдений)	57
Лесистость, %	6.9
Распаханность, %	46.9
Залуженность, %	38.8
Интенсивность эрозии почв на пашне, т/га в год	1.152

Все реки, протекающие по территории, относятся к трем бассейнам: Волжскому, Донскому и Камыш-Самарских озер. К Волжскому бассейну относится большая часть рек Заволжья (Большой Иргиз, Малый Иргиз, Большой Караман, Малый Караман, Еруслан и др.) и часть рек Правобережья (Терса, Терешка, Чардым, Курдюм и др.). К Донскому бассейну принадлежит большинство рек Правобережья (Хопер, Медведица, Иловля и их притоки). Основными реками бассейна Камыш-Самарских озер являются реки Большой и Малый Узень [6].

Здесь, как отмечалось, доминируют степные ландшафты. Выделяются три подзоны: северная, типичная и сухая степь. В настоящее время зональные степные ландшафты распаханы, сохранились лишь небольшие островки некогда обширных степных пространств. В основном это старозалежный земельный фонд, значительно расширившийся в 90-х гг. XX века. Встречаются и участки целинных степей, приуроченных к овражно-балочной сети и долинам рек, как правило, подвергающиеся интенсивному выпасу [9]. Естественные леса и лесопосадки занимают 6.9% территории, в степной зоне леса приурочены только к долинам рек и балок. Большая часть лесостепной и степной зоны занята типичной лугово-степной растительностью с примесью разнотравья, в составе которой в южной части территории появляются представители ксерофитной растительности.

На всей исследуемой территории фиксируется влияние глобального потепления климата на региональные климатические процессы. Рост глобальной приповерхностной температуры отмечается по результатам наблюдений за последние 150 лет, с увеличением скорости роста в 1970–2000-е гг. [12]. Анализ динамики климатических сумм температур, накопленных за зимний сезон последних шести десятилетий по ст. Саратов, показал, что второе десятилетие (1951–1960 гг.) было самым холодным. В последующие десятилетия, хотя и отмечались отдельные холодные зимы, но наблюдалась устойчивая тенденция потепления зим [14]. Повышение зимних температур воз-

духа и увеличение количества и продолжительности оттепелей привело к уменьшению максимальных расходов воды весеннего половодья при одновременном росте доли подземного стока. Уменьшение половодья было наиболее выраженной в бассейне р. Дон, доля стока воды за половодье снизилась до 50% и менее от годовой величины, тогда как в первой половине XX в. на половодье приходилось около 60–70% годового стока [19]. Эти данные свидетельствуют об уменьшении поверхностного склонового стока и снижении роли талого стока в оврагообразовании.

ИЗУЧЕННОСТЬ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Рассматривая историю вопроса, следует отметить, что изучение овражной эрозии ведется уже более семи веков. Первые описания форм, имеющие сходства с оврагами и балками, относятся к XIV веку. В XV–XVII веках описания оврагов приведены в многотомных писцовых книгах [16]. Молодые формы рельефа, которые образуются в результате работы долговременных дождей и ливней, первым из русских ученых выделил М.В. Ломоносов [2].

Период (конец XIX–начало XX веков) активного роста площади распаханной земли на юге Нечерноземья и в Черноземной зоне совпадает с периодом интенсивного образования и роста оврагов, что, в свою очередь, привело к осознанию необходимости бережного отношения к земле, применения противоэрозионных мер. Так, в Саратовской губернии начало оврагоукрепительных работ и лесопосадок приходится на 1903 г. [20]. Получило свое развитие и региональное исследование овражной эрозии для обоснования мероприятий по борьбе с ней. Наиболее существенные работы этого периода связаны с именами В.В. Докучаева и его учеников [2]. Усиление научного и практического интереса к овражной эрозии начинается с 40-х годов XX в. Это было связано с организацией крупных коллективных хозяйств – совхозов и колхозов, во владение которых перешла земля, пораженная местами водной эрозией [17].

Изучением эрозионных процессов в пределах разных ландшафтно-географических зон страны занимался академик С.С. Соболев (1939–1948). По С.С. Соболеву густота овражной сети на территории Саратовской области составляла от 0 до 0.3 км/км² в Заволжье и от 0.3 до 0.6 км/км² в Правобережье, достигая максимума вблизи г. Хвалынский [16].

Исследования овражной эрозии на территории Саратовского Правобережья в период 1930–1980-х гг. проводились разными организациями федерального и регионального уровней и научными коллективами: а) в 1930–1960-х годах изучением эрозионных процессов занимались экспедиции Московского госуниверситета и Института географии РАН (С.С. Соболев, Ю.А. Мещеряков, С.К. Горелов и др.); б) в 1960–1980-х – Казанского госуниверситета (А.П. Дедков, В.И. Мозжерин). Как отмечают авторы статьи “Состояние изученности овражной эрозии на территории Саратова и его окрестностей” [22], наиболее планомерные, выполненные по единой методике исследования овражной эрозии Саратовского Правобережья проводились в течение ряда лет геологами и геоморфологами Саратовского госуниверситета и НИИ Геологии СГУ (В.Н. Зайонц, Ю.В. Горошков, Г.И. Лотоцкий и др.). На составленных современных картах активности овражной эрозии на территории Российской Федерации в 2005 и 2020 гг. (Е.Ю. Королев Федеральное агентство по недропользованию. ФГБУ “Гидроспецгеология”. 2006; 2021) большая часть территории Саратовской области отнесена к району, пораженному оврагами, но количественные данные об овражности не приведены. Левобережная полоса вдоль волжских террас отнесена к области, где овраги либо развиты спорадически, либо отсутствуют. В Национальном атласе России также есть мелко-масштабная карта овражности, включающая и Саратовскую область [42]. На этой карте в правобережной части степень развития овражной сети сильная и очень сильная, с густотой оврагов 0.50–1.30 и более 1.30 км/км². В левобережной части – умеренная и значительная с овражностью 0.02–0.10 и 0.10–0.50 км/км² соответственно. На наш взгляд, приве-

денные в этом источнике данные по овражности завышенные по причине того, что картографирование оврагов проводилось по топографическим картам. На топографических картах, с одной стороны, затруднительно идентифицировать овраги, перешедшие в балочную стадию развития, а с другой, — дифференцировать промоины от оврагов. Таким образом, на территорию исследования либо отсутствуют карты современной овражности, либо они составлены без привлечения наиболее надежного для этих целей инструмента — ДДЗЗ высокого пространственного разрешения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Крупномасштабное картографирование современного овражного расчленения проводилось методом визуального дешифрирования наиболее качественных современных RGB-изображений местности высокого и сверхвысокого разрешения (2016–2020 гг.), предоставленных ресурсом “Nokia”, “Bing” в программе “SAS.Планета”.

Важным этапом работ являлось 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 овражных форм. Выявлена также зависимость четкости изображения 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. Особенностью оврагов Саратовской области было отмечено большое количество длинных и узких овражных форм в меловых отложениях, имеющих незадернованные склоны, но находящиеся в стабильном, “законсервированном” состоянии без следов активного роста (рис. 2).

Для идентификации оврагов на пограничных стадиях их развития были определены критерии, позволяющие исключить из дешифрирования собственно промоины, которые отличаются от овражной 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, запахируются сельскохозяйственной техникой при обработке. Также при глубине более 1.5 м склоновые потоки полностью дренируют все почвенные горизонты и вскрывают материнскую породу (четвертичные и коренные отложения). Балочные формы имеют плохо выраженную бровку, трапециевидный поперечный профиль, заросшие луговой и древесно-кустарничковой растительностью склоны, а устье и вершина определяется не четко [4]. 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. Вторичный врез в днищах балочных форм и логов относился к донным оврагам (рис. 3).

Результатом визуального дешифрирования всех овражных форм на территории Саратовской области является созданный векторный слой тальвегов оврагов (рис. 4), который содержит 17628 линейных объектов, а также данные по их типу (склоновые, береговые, донные). Проверка топологии слоев и исправление геометрических ошибок осуществлялось в программе “Easy Trace”.

В качестве операционно-территориальных единиц для картографического отображения овражности использовались бассейны малых рек, векторная карта которых со-

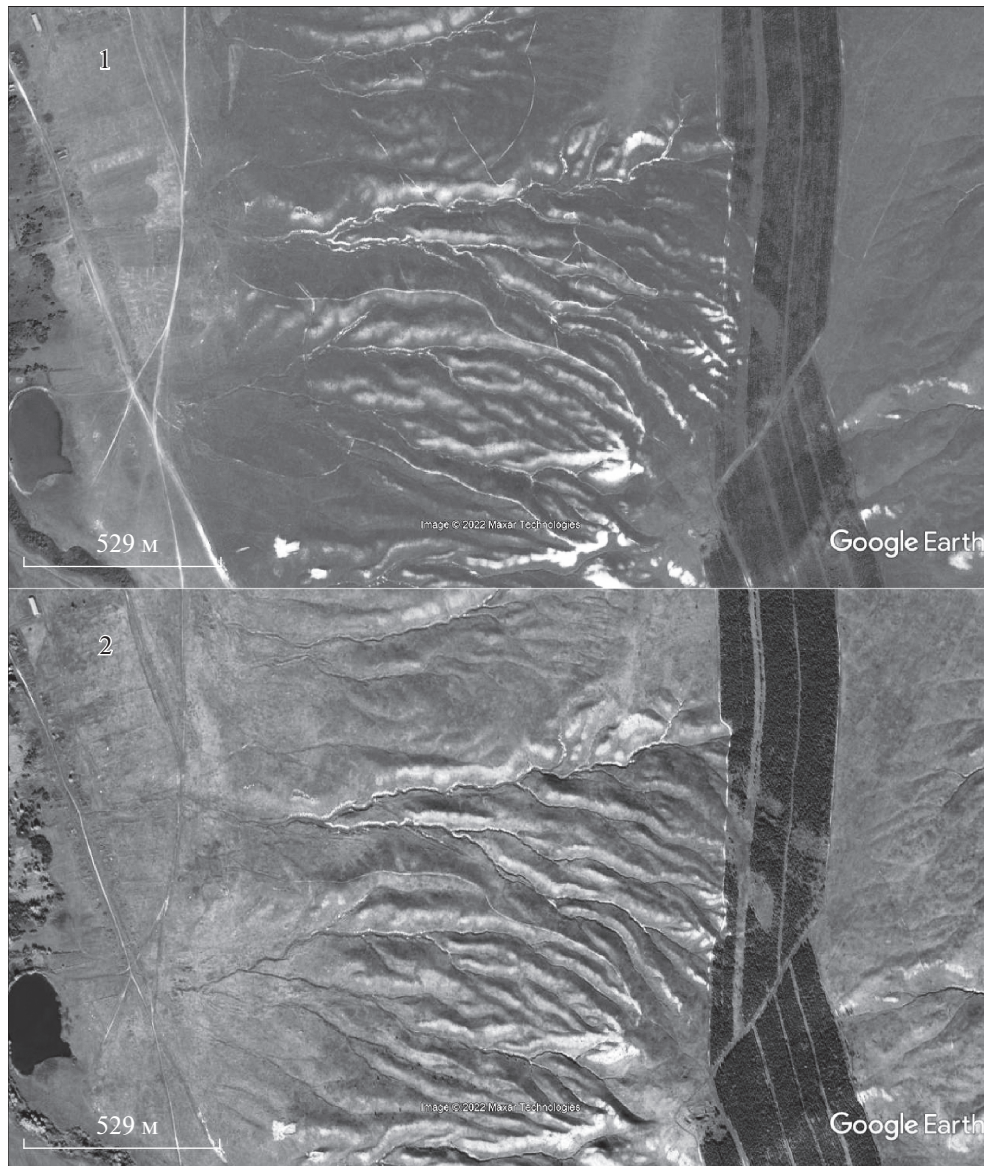


Рис. 2. Пример отображения овражной сети Саратовской области на космических снимках: 1 – 2007 г., 2 – 2018 г. (с. Труевая Маза, $52^{\circ}18'45''$ с.ш., $47^{\circ}24'49''$ в.д.).

Fig. 2. The example of gully network of the Saratov region in satellite images: 1—2007, 2—2018 (Truevaya Maza, $52^{\circ}18'45''$ N, $47^{\circ}24'49''$ E).

здана нами и представлена на тематическом геопортале [41]. Для каждого бассейна (их 704) вычислялась суммарная протяженность овражной сети (м). Степень овражного расчленения территории определялась по наиболее часто используемым для оценки овражности показателям: густоте (суммарная протяженность оврагов, отнесенная к



Рис. 3. Типы оврагов: 1 – склоновый, 2 – береговой, 3 – донный.

Fig. 3. Types of gullies: 1—slope, 2—coastal, 3—bottom.

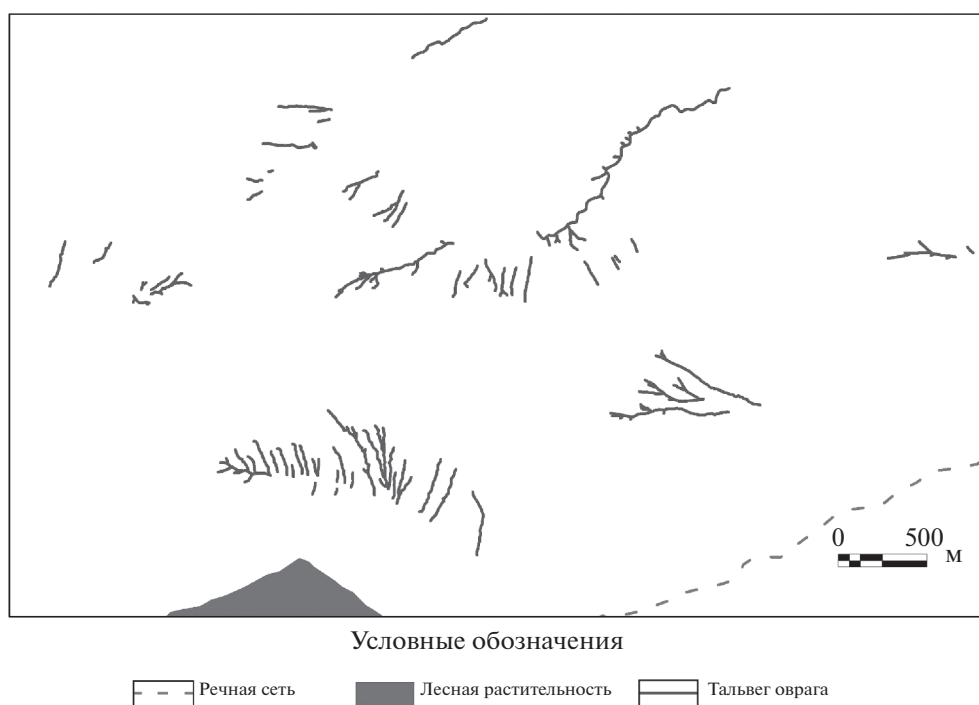


Рис. 4. Пример отображения векторного слоя тальвегов оврагов (52°10'15" с.ш., 46°41'36" в.д.).

Fig. 4. The example of vector layer of gully thalwegs (52°10'15" N, 46°41'36" E).

единице площади — м/км²) и плотности (количество вершин оврагов на единицу площади — ед./км²).

Учитывая размеры территории картографирования, пространственное развитие оврагов и ранее опубликованные материалы по географическому распространению оврагов, было проведено районирование овражной эрозии. В этом регионе по густоте по густоте овражного расчленения выделено: 1) 0 м/км² (отсутствие овражного расчленения); 2) более 0—5 м/км² (очень слабое овражное расчленение); 3) 5—20 м/км² (слабое овражное расчленение); 4) 20—50 м/км² (умеренное овражное расчленение); 5) 50—100 м/км² (сильное овражное расчленение); 6) 100—500 км/км² (очень сильное овражное расчленение).

Таблица 2. Количество оврагов и суммарное распределение длин
Table 2. Number of the gullies and total length distribution

	Склоновые	Береговые	Донные	Сумма
Количество овражных форм, ед.	15645	1515	468	17628
Общая сумма длин, км	1534.8	35.1	42.3	1612.2
Средняя длина, м	98	23	92	—

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам исследования суммарная протяженность овражной сети на территории Саратовской области составила 1574 км, где средняя длина оврага — 92 м. Из всех овражных форм преобладающее большинство относится к склоновому типу — 88%. Береговые овраги составили 9% от их общего числа (табл. 2). На донные овраги приходится 3%. Среднее значение густоты овражного расчленения составляет 20.5 м/км². В 48% бассейнов овраги отсутствуют. Очень сильное овражное расчленение отмечается в пределах Приволжской возвышенности вдоль правого берега Волги (рис. 5).

На Правобережье Саратовской области преобладающее большинство бассейнов характеризуется сильным овражным расчленением. Минимальные значения густоты оврагов (меньше 5 м/км²) имеют речные бассейны Заволжья. В пространственном распределении плотности оврагов отмечается сходство с распределением показателя густоты оврагов (рис. 6). Среднее значение плотности оврагов составляет 0.2 ед./км², достигая максимума 5.2 ед./км². Эти результаты согласуются с ранее полученными данными по овражности в Татарстане, Чувашии и Ульяновской области. Большинство речных бассейнов с интенсивной овражной эрозией географически расположены также на Приволжской возвышенности в пределах Чувашии и Татарстана.

В бассейнах, где присутствует овражное расчленение, преобладает густота оврагов в интервалах от более 0 до 20 м/км² (рис. 7). Это 50% от общей площади территории Саратовской области и почти в 3 раза больше площади бассейнов с густотой оврагов более 20 м/км².

Методом корреляционного анализа была оценена связь густоты оврагов с рядом природно-антропогенных характеристик изучаемых бассейнов (табл. 3). Прямая и наиболее сильная связь среди выбранных характеристик установлена между показателями густоты оврагов и средней крутизной склонов. Из-за сильного овражного расчленения доля пашни на данных территориях снижается, поэтому наблюдается обратная связь между распаханностью и густотой овражной эрозии. Между узкими и длинными оврагами образуются широкие залуженные межовражные пространства. Это и обуславливает, казалось бы, парадоксально прямую связь между залуженностью территории и густотой оврагов.

Для определения временной динамики линейного и площадного развития оврагов был взят ключевой участок 1.5 км², в пределах которого для каждой овражной формы был определен линейный и площадной прирост (рис. 8) по двум разновременным космическим снимкам Google, полученным за относительно короткий период (2005—2021 гг.).

Выбор участка обусловлен наличием:

- 1) разновременных снимков высокого разрешения;
- 2) оврагов, у которых внешне хорошо выражены признаки активного развития (четко выраженная вершина и бровки, обнаженные борта, V-образный поперечный профиль);
- 3) пашни в пределах выбранного участка.

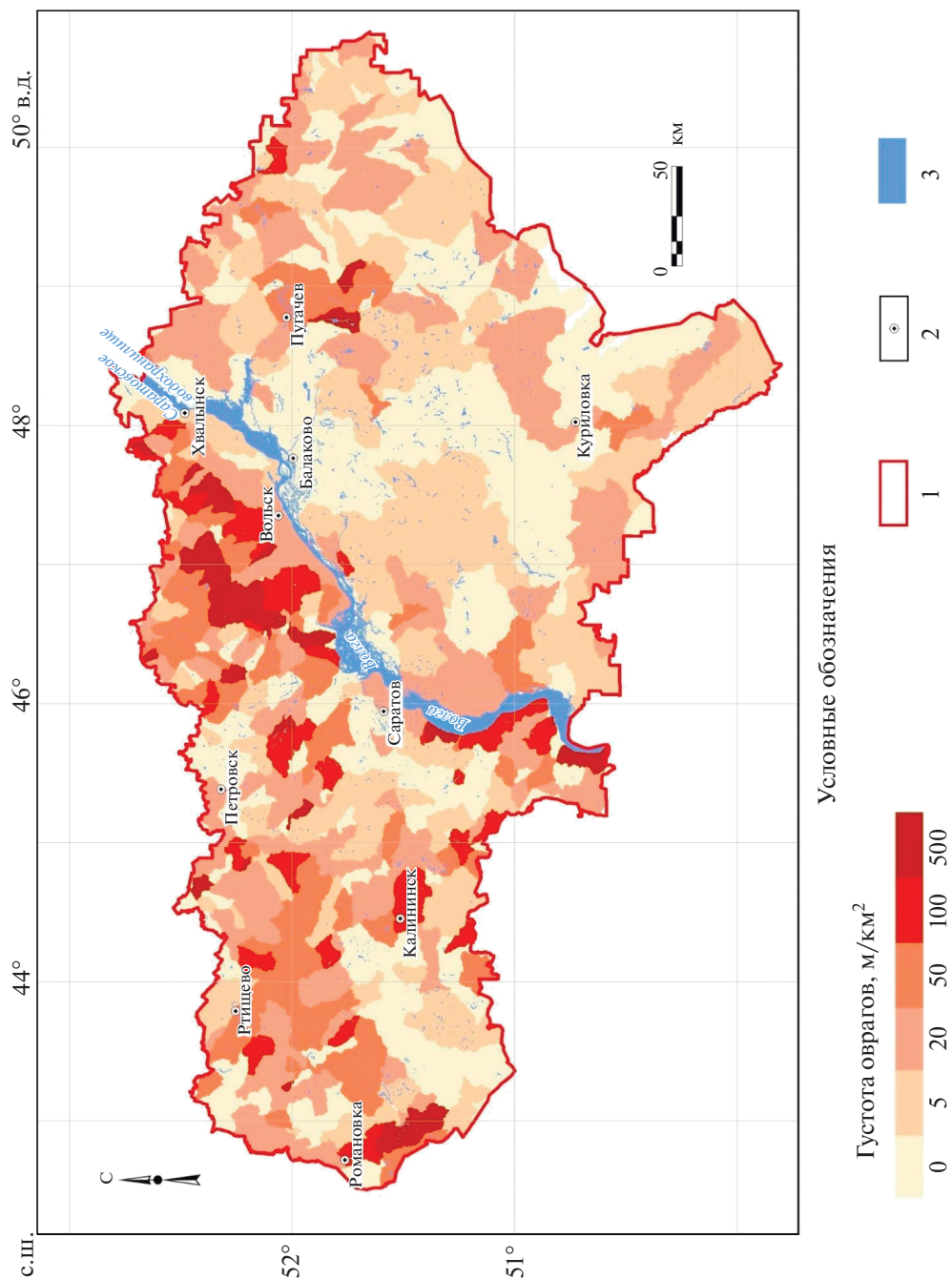


Рис. 5. Густота современной овражной сети на территории Саратовской области. 1 — граница Саратовской области, 2 — населенные пункты, 3 — водные объекты.

Fig. 5. The gully length density in the Saratov region. 1—the border of the Saratov region, 2—settlements, 3—water objects.

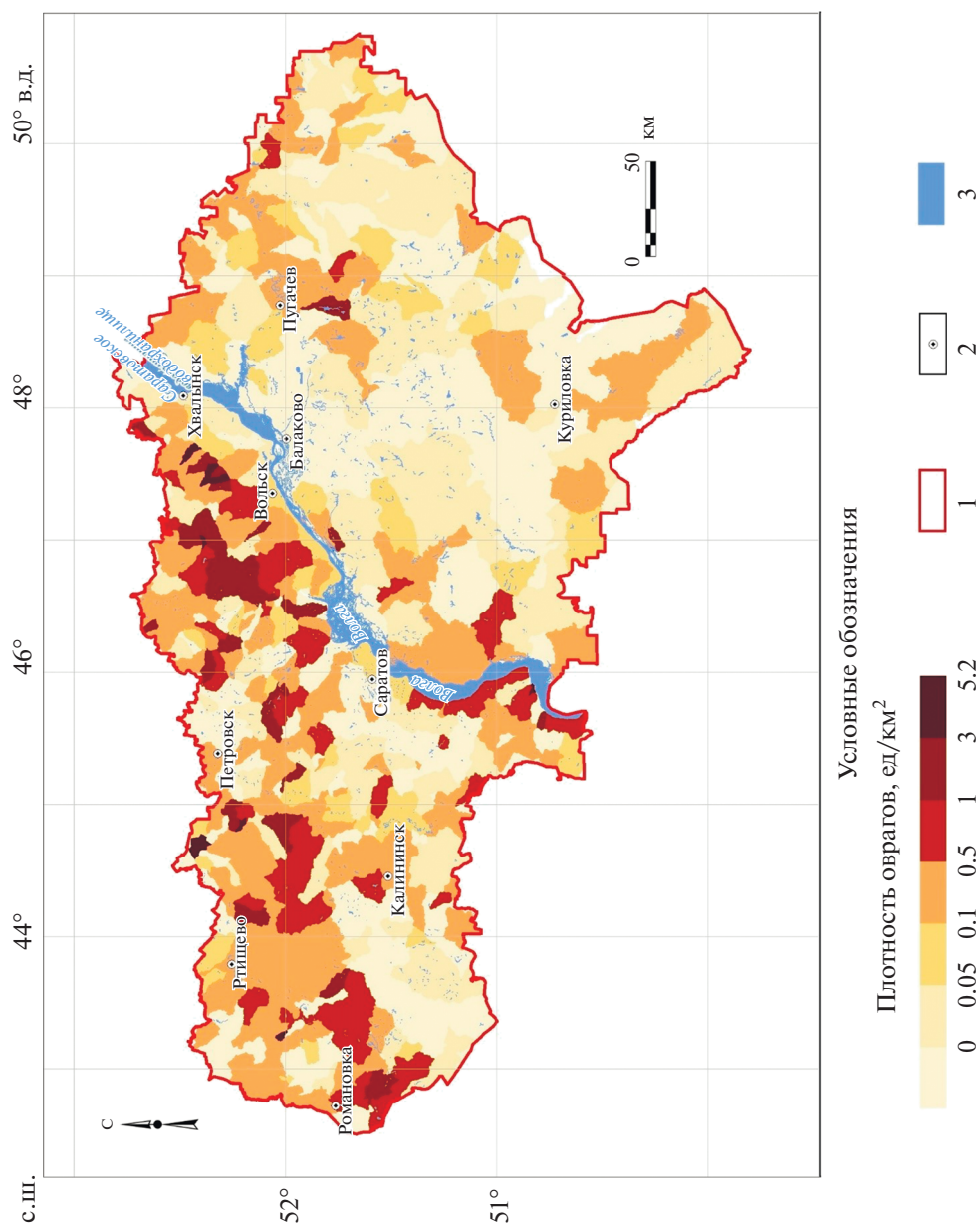


Рис. 6. Плотность современной овражной сети на территории Саратовской области. 1 — граница Саратовской области, 2 — населенные пункты, 3 — водные объекты.

Fig. 6. The modern gully heads density in the Saratov region. 1—the border of the Saratov region, 2—settlements, 3—water objects.

Для привязки одного космического снимка (растра) был взят другой снимок, полученный из программы “SAS.Планета”, который уже имеет географическую привязку. После регистрации растров оцифровывались бровка и тальвег каждого оврага. Далее производилось наложение схем дешифрирования и вычислялись площадной и линей-

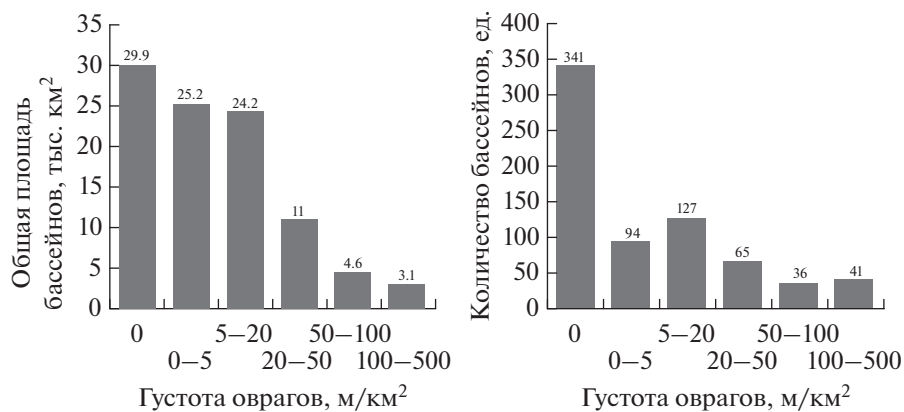


Рис. 7. Распределение густоты оврагов по количеству бассейнов и по общей площади бассейнов.

Fig. 7. Distribution of the gully length density by the number of the basins and by the total area of the basins.

ный приросты эрозионной формы (Ермолаев и др., 2017; Ермолаев и др., 2021). Результаты исследования приведены в табл. 4.

Всего на ключевом участке было определено 6 овражных форм, со средней удаленностью от пашни в 2021 г. – 205 м. и средним линейным приростом 0.4 м/год (табл. 4). Ближайший к пашне овраг (номер 1) характеризуется максимальными значениями линейного и площадного прироста. Активный рост имеют также донный и придорожный овраги.

Причины роста оврагов в первую очередь определяются изменениями в условиях формирования склонового поверхностного стока. По результатам мониторинга эрозионных процессов на черноземах Поволжья (на полях Экспериментального хозяйства ФГБНУ «НИИСХ Юго-Востока») с 1973 по 2015 г. [10] исследователи отмечают, что наряду с климатическими факторами важную роль в формировании весеннего стока талых вод играют крутизна и экспозиция склона, а также характер сложения поверхности поля. С ростом крутизны склона до 5–7 градусов интенсивность эрозион-

Таблица 3. Коэффициент корреляции густоты оврагов с природно-антропогенными характеристиками территории исследования ($n = 363$; $p < 0.05$)

Table 3. Correlation coefficient of the gully density with the natural and anthropogenic characteristics of the study area ($n = 363$; $p < 0.05$)

Показатели	Коэффициент корреляции
Распаханность, %	–0.3
Лесистость, %	0.2
Залуженность, %	0.2
Средняя крутизна склонов, град.	0.4
Модуль стока воды, м³/(сек. м²)	0.2
Годовой слой стока воды, мм	0.3

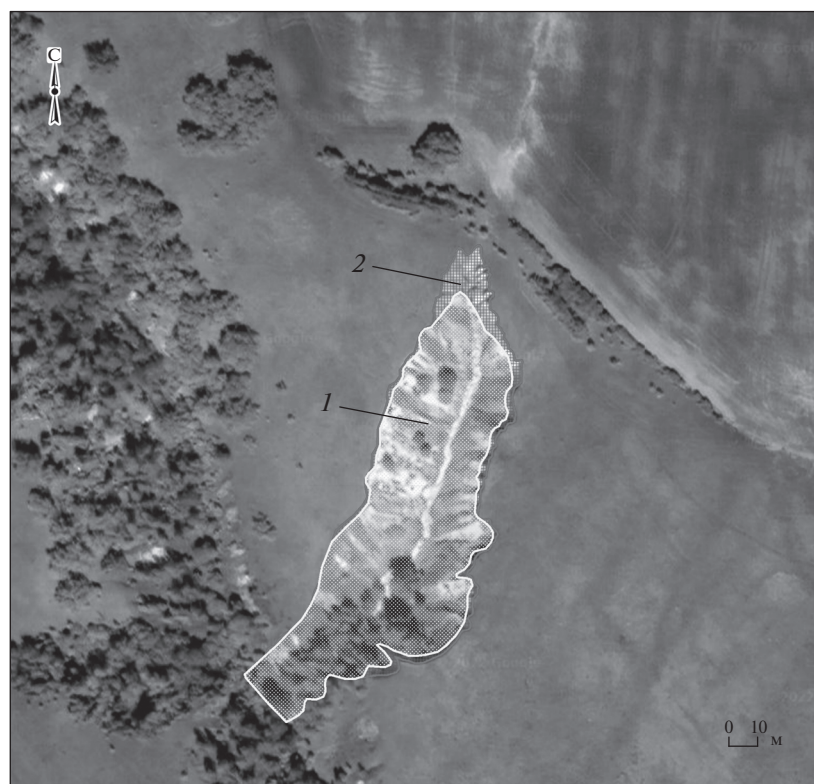


Рис. 8. Овраг № 1 вблизи с. Марфино. 1 – площадь оврага в 2005 г., 2 – площадной прирост оврага с 2005 по 2021 гг.

Fig. 8. Gully No. 1 near Marfino. 1—the area of the gully in 2005, 2—the area growth of the gully from 2005 to 2021.

ных процессов значительно увеличивается. При различном использовании пашни потери воды увеличиваются в 1.2 раза, а почвы в 1.8 раза. Так на склоне южной экспозиции среднегодовой сток талых вод в многоводный период был в 2.1 раза выше, чем на

Таблица 4. Результаты дешифрирования оврагов на разновременных космических снимках 2005–2021 гг.

Table 4. The results of gullies interpretation on multi-time satellite images 2005–2021

Номер оврага	Тип оврага	Удаленность до ближайшей границы пашни (2021 г.), м	Линейный прирост, м/год	Площадной прирост, м ² /год
1	Склоновый	18	1.1	48.3
2	Склоновый	163	0.4	5.5
3	Склоновый	345	0	0
4	Склоновый	155	0	0
5	Донный	343	0.9	41.3
6	Придорожный (в среднем 5 м от асфальтированной дороги)	—	1	25.9

склоне северной экспозиции. Максимальные потери воды в период весеннего снеготаяния наблюдались на плотной пашне (многолетние травы, озимые). Сток талых вод на плотной пашне был в 2 раза выше, чем на зяби. С увеличением крутизны склона плотная пашня более эрозионно устойчива, чем зябь [10].

Об уменьшении поверхностного стока и смыва с пахотных земель за последние 30 лет свидетельствует сокращение темпов аккумуляции наносов в днищах балок в различных частях южной половины европейской части России. Детальные исследования проведены на малом водосборе в бассейне р. Большой Колышлей (бассейн р. Медведица) с использованием радиоцезиевого и почвенно-морфологического методов показали, что темпы аккумуляции после 1986 г. сократились 4–6 раз [1].

В то же время в верхнем, промоинном звене, происходят значительные трансформации. Дешифрирование струйчатых размылов, 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 промоинной сети (в среднем в 4.6 и 10 раз соответственно). Продвижение пояса струйчатой эрозии идет в сторону водораздела за счет образования новых размылов в верхних частях промоинной сети и ее удлинения, при этом наблюдается заметное сокращение ширины эрозионно-слабоактивного пояса – микроручейковой эрозии [34].

Оценка динамики пахотных угодий за тридцатилетний период (1985–2015) в нескольких бассейнах рек европейской части России установила сокращение пашни во всех исследуемых бассейнах [7, 21]. Так, в бассейне р. Медведицы в этот период уменьшение доли пахотных угодий составило 9.6%, также наблюдалось уменьшение средних значений уклонов и длин линий тока.

Значения густоты и плотности овражной эрозии в Саратовской области коррелируют с результатами, полученными нами ранее для других территорий востока Русской равнины (Татарстан, Ульяновская область и Чувашия), однако на территории Саратовского Предволжья были выявлены районы с экстремально высокой пораженностью склонов линейными формами эрозии и развитием “бедлендов”, развивающихся на фоне широкого распространения меловых горных пород, высокой крутизны склонов и низкой залесенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено геоинформационное картографирование тальвегов современных оврагов с использованием ДДЗЗ. Общая протяженность оврагов составила 1612 км. На территории исследования определено доминирование склоновых оврагов. Сформирована геопространственная база данных оврагов, включающая не только морфометрические показатели, но и сведения о природно-антропогенных условиях их развития. Созданы цифровые карты густоты и плотности овражного расчленения. Наиболее высокое расчленение наблюдается в пределах Приволжской возвышенности, максимальная густота оврагов – 443 м/км². Низкие показатели овражного расчленения фиксируются в Заволжье. Средняя густота на территории Саратовской области составляет 20.5 м/км².

Выявленные территории с сильной и очень сильной овражной эрозией требуют особого внимания и организации геоэкологического мониторинга для предотвращения деградации почв и сельскохозяйственных угодий. Созданный векторный слой тальвегов оврагов может стать основой для организации мониторинга на территории Саратовской области.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование (методика, анализ данных, результаты) выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00025; <https://rscf.ru/project/22-17-00025/>); программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета – “ПРИОРИТЕТ-2030” (фондовые материалы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусаров А.В., Шарифуллин А.Г., Голосов В.Н. Современный тренд эрозии пахотных черноземов обыкновенных на Приволжской возвышенности (Саратовская область) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1517–1538. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18120043>
2. География овражной эрозии / Под редакцией Е.Ф. Зориной. М.: изд-во МГУ. 2006. 324 с.
3. Ермолаев О.П. Эрозия в бассейновых геосистемах / О.П. Ермолаев. Казань: Издательство “УНИПРЕСС”. 2002. 264 с.
4. 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. записки Казанск. ун-та. 2017. Т. 159. № 4. С. 668–680.
5. Ермолаев О.П., Медведева Р.А., Иванов М.А. Современная овражная эрозия в лесных и лесостепных ландшафтах востока Русской равнины // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 4. С. 28–41. <https://doi.org/10.31857/S0435428121040064>
6. Жанабекова Е.И., Васильева Л.Н., Абдулов Р.Ж. К вопросу об использовании водных ресурсов в Саратовском Левобережье // Фундаментальные науки и практика. 2010. Т. 1. № 3. С. 17–19.
7. Иванов М.А. Изменения площади пахотных угодий в бассейнах рек Европейской территории России за период 1985–2015 гг. как фактор динамики эрозии почв / М.А. Иванов, А.В. Прищепов, В.Н. Голосов, Р.Р. Залялиев, К.В. Ефимов, А.А. Кондратьева, А.Д. Киняшова, Ю.К. Ионова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 149–157.
8. Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г. География динамики земельной эрозии почв на Европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
9. Макаров В.З., Волков Ю.В., Буланый Ю.И., Проказов М.Ю., Мукало А.С. Уникальные степные природные комплексы дальнего Саратовского Заволжья. – Изв. Саратов. ун-та. Сер. Науки о земле. Саратов. 2009. № 9 (1). С. 28–32.
10. Медведев И.Ф., Левицкая Н.Г., Макаров В.З., Назаров В.А. Активность эрозионных процессов на черноземах Поволжья. Аграрный научный журнал. 2016. № 8 С. 29–34.
11. Овражная эрозия востока Русской равнины / Науч. ред. А.П. Дедков. Казань: Казанский ун-т. 1990. 140 с.
12. Переведенцев Ю.П. Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа / Ю.П. Переведенцев, В.В. Соколов, Э.П. Наумов [и др.]; науч. Ред. М.А. Верещагин. Казань: Казан. ун-т. 2013. 274 с.
13. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / Под. ред. д.г.н. В.Н. Голосова, д.г.н. О.П. Ермолаева. – Казань: Изд-во АН РТ. 2019. 372 с
14. Пряхина С.И. Мониторинг климата Саратовской области / С.И. Пряхина, Ю.Н. Фридман, М.Ю. Васильева // Известия Саратовского университета. 2006. Т. 6. Серия Науки о Земле, вып. 1. С.15–18.
15. Рыжов Ю.В. Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2015. 180 с.
16. Соболев С.С. Развитие эрозионных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними / С.С. Соболев. М.: Изд-во АН СССР. 1948. 308 с.
17. Ступишин А.В. Географический анализ овражно-балочных систем в пределах Татарской АССР / А.В. Ступишин, В.Н. Дуглав, Н.Н. Лаптева. – Казань: Издательство Казанского университета. 1980. 152 с.
18. Усов Н.И. Почвы Саратовской области. Ч.1. / Н. И. Усов, проф. – Саратов : Облгиз, 1948. 286 с.
19. Фролова Н.Л. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение / Н.Л. Фролова, М.Б. Киреева, С.А. Агафонова, В.М. Евстигнеев, Н.А. Ефремова, Е.С. Поваляшников // Водное хозяйство России. 2015. № 4. С. 4–20.

20. Цветков М.А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год / М.А. Цветков. - М., Изд-во Акад. Наук СССР. 1957. 213 с.
21. Чибилёв А.А., Мелешкин Д.С., Григорьевский Д.В. Современное состояние земель и сельскохозяйственных угодий регионов степного пояса России // Вопросы степеведения. 2021. № 2. С. 72–81.
22. Яшков И.А. Состояние изученности овражной эрозии на территории Саратова и его окрестностей / И.А. Яшков, А.С. Шешнёв, А.В. Иванов // Известия Саратовского университета. 2008. Т. 8 (2). С. 30–35.
23. Blong R.J., Graham O.P., Veness J.A. The role of sidewall processes in gully development // Earth Surface Processes and Landforms. 1982. № 7. P. 381–385.
24. Bučko Š., & Mazúrová V. Gully erosion in Slovakia. Water erosion in Slovakia (Zachar, D. ed.). SAS Publishing, Bratislava. 1958. P. 68–101.
25. Castillo C. and Gómez J.A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches // Earth-Science Reviews. № 160. 2016. P. 300–319.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
26. De Foucault B., Colbeaux J.P., Bonnet T., Brac P., Courtecuisse R., Debuyser M., Louche B. (1997). Les creuses de la region Nord/Pas-de-Calais: premiers resultats d'etudes multi-criteres. Annales-société Geologique du Nord. № 5. P. 385–394.
27. Gawrysiak L., Harasimiuk M. Spatial diversity of gully density of the Lublin Upland and Roztocze Hills (SE Poland). Annales UMCS, sec. B LXVII (1). 2012. P. 27–43.
28. Golosov V., Yermolaev O., Rysin I., Vanmaercke M., Medvedeva R. and Zaytseva M. Mapping and Spatial-temporal Assessment of Gully Density in the Middle Volga Region. Russia Earth Surface Processes and Landforms. 2018. 43(13). P. 2818–34.
<https://doi.org/10.1002/esp.4435>
29. Ghimire S.K., Higaki D., 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.
30. Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // Catena. 2006. № 68. P. 133–140.
31. Jóźefaciuk C. and Jóźefaciuk A. Struktura przestrzenna erozji wąwozowej w Polsce. Pam. Puł. 1983. 79.
32. Kertész A. and Krecek J. Landscape degradation in the world and in Hungary. Hungarian Geographical Bulletin. 2019. № 68(3). P. 201–221.
<https://doi.org/10.15201/hungeobull.68.3.1>
33. Ohmori H., Speight J.G., 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. № 21. P. 65–84.
34. Platoncheva E., Yermolaev O., 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. № 10(5). 167. P. 17
<https://doi.org/10.3390/geosciences10050167>
35. Radoane M., Ichim I., Radoane N. Gully distribution and development in Moldavia, Romania. Catena. 1995. 24(2), 127–146.
36. Seginer I. Gully development and sediment yield // Journal of Hydrology. 1966. № 4. P. 236–253.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(66\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(66)90082-5)
37. Smith B.J. Effects of climate and land-use change on gully development: an example from northern Nigeria // Zeitschrift für Geomorphologie. 1982. № 44. P. 33–51.
38. Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Fernando J., Bezerra R., Bolysov S., Dvynskih 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., Yermolaev O. How fast do gully headcuts retreat // Earth Science Reviews. 2016. № 154. P. 336–355.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
39. Vanmaercke M., Panagos P., Vanwallegghem T. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art, Earth-Science Reviews. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>
40. Yermolaev O., Medvedeva R., Poesen J. Spatial and temporal dynamics of gully erosion in anthropogenically modified forest and forest-steppe landscapes of the European part of Russia // Earth Surface Processes and Landforms, 2022. V. 47. Is. 12. P. 2926–2940.
<https://doi.org/10.1002/esp.5433>
41. URL: <http://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения: 01.08.2022).
42. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/127-129.html?ysclid=18ft0aqone716051615/> (дата обращения: 01.09.2022).

Geoinformation Mapping of the Gully Network (on the Example of the Saratov Region)**R. A. Medvedeva^{1, *} and O. P. Yermolaev^{1, **}**¹*Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environmental Sciences, Kazan, Russia***E-mail: gregina8@mail.ru****E-mail: oermol@gmail.com*

Abstract—Gully erosion is the extreme process of the activity of temporary water flows on slopes, belongs to the category of exogenous natural hazards. An assessment of gully erosion in the area of intensive agriculture in Russia (in the steppe zone) is a topical task. It can be solved by using high resolution remote sensing data and GIS mapping. Geoinformation mapping of gullies and spatial and temporal assessment was carried out within a large region of Russia (Saratov region, 100.2 thousand km²). The choice of the study area is due to the dominance of steppe landscapes and to the lack of data on modern gully erosion. In this study, visual interpretation of remote sensing data was used to detect gullies and basin approach (704 basins of small rivers) was applied to map the results. The thalwegs of gullies was identified according to the formed system of interpretation signs of gully forms. The vector layer containing 17628 linear objects was created for the study area, and the classification of gullies into types was also carried out. The total length of the gully network in the Saratov region is 1612 km, where the average length of the gullies is 92 m. The majority of gullies (88%) belong to the slope type. More than 80% of the total area of the region is characterized by a weak gully density and the absence of gullies. The maximum values of the length density of gullies (up to 443 m/km²) are observed in the river basins of the Right Bank of the Volga River in the Saratov region, the minimum (more than 0 to 5 m/km²) in the Left Bank river basins of the Volga River. The spatial distribution of the gully heads density (the average value is 0.2 number of gully heads/km², the maximum is 5.2 number of gully heads/km²) corresponds to the distribution of the gully length density. The connection is determined between the indicators of the gully density and the average steepness of the slopes in the river basins by the method of correlation analysis. The peculiarity of the erosion network of the Saratov region are narrow and long gullies in Cretaceous sediments, having slopes without vegetation, but being in a “preserved” state without signs of active growth. The direct connection between the pasture area and the gully density is fixed due to the wide areas between gullies occupied by the grass land. Areas with extremely high erosion and the development of “bad-lands” have been identified in the Saratov region. They are located within the Volga upland and are developed on Cretaceous deposits with high slope steepness and low forest cover.

Keywords: gully, gully network, gully length density, gully heads density, geoinformation mapping

REFERENCES

1. Gusarov A.V., Sharifullin A.G., Golosov V.N. Sovremennyy trend jerozii pahotnykh chernozemov obyknovennykh na Privolzhskoy vozvyshechnosti (Saratovskaya oblast') // *Pochvovedenie*. 2018. № 12. S. 1517–1538.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18120043>
2. *Geografija ovrazhnoj jerozii* / Pod redakciej E.F. Zorinoj. M.: izd-vo MGU. 2006. 324 s.
3. Ermolaev O.P. Jerozija v bassejnykh geosistemah / O.P. Ermolaev. Kazan': Izdatel'stvo “UNI-PRESS”. 2002. 264 s.
4. Ermolaev O.P., Medvedeva R.A., Platoncheva E.V. Metodicheskie podhody k monitoringu processov jerozii na sel'skohozjajstvennykh zemljah Evropejskoj chasti Rossii s pomoshh'ju materialov kosmicheskikh s`emok // *Uch. zapiski Kazansk. un-ta*. 2017. T. 159. № 4. S. 668–680.
5. Ermolaev O.P., Medvedeva R.A., Ivanov M.A. Sovremennaja ovrazhnaja jerozija v lesnykh i leso-stepnykh landshaftah vostochnoj Russkoj ravniny // *Geomorfologija*. 2021. T. 52. № 4. S. 28–41.
<https://doi.org/10.31857/S0435428121040064>
6. Zhanabekova E.I., Vasil'eva L.N., Abdulov R.Zh. K voprosu ob ispol'zovanii vodnykh resursov v Saratovskom Levoberezh'e // *Fundamental'nye nauki i praktika*. 2010. T. 1. № 3. S. 17–19.
7. Ivanov M.A. Izmeneniya ploshhadi pahotnykh ugodij v bassejnakh rek Evropejskoj territorii Rossii za period 1985–2015 gg. kak faktor dinamiki jerozii pochv / M.A. Ivanov, A.V. Prishhepov, V.N. Go-

- losov, R.R. Zaljaliev, K.V. Efimov, A.A. Kondrat'eva, A.D. Kinjashova, Ju.K. Ionova // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. T. 14. № 6. S. 149–157.
8. Litvin L.F., Kirjuhina Z.P., Krasnov S.F., Dobrovol'skaja N.G. Geografija dinamiki zemleledel'cheskoj jerozii pochv na Evropejskoj territorii Rossii // *Pochvovedenie*. 2017. № 11. S. 1390–1400.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
 9. Makarov V.Z., Volkov Ju.V., Bulanyj Ju.I., Prokazov M.Ju., Mukalo A.S. Unikal'nye stepnye prirodnye komplekсы dal'nego Saratovskogo Zavolzh'ja. — *Izv. Saratov. un-ta. Ser. Nauki o zemle*. Saratov. 2009. № 9 (1). S. 28–32.
 10. Medvedev I.F., Levickaja N.G., Makarov V.Z., Nazarov V.A. Aktivnost' jerozionnyh processov na chernozemah Povolzh'ja. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2016. № 8. S. 29–34.
 11. Ovrashnaja jerozija vostoka Russkoj ravniny / Nauch. red. A.P. Dedkov. Kazan': Kazanskij un-t. 1990. 140 c.
 12. Perevedencev Ju.P. Klimat i okružhajushhaja sreda Privolzhskogo federal'nogo okruga / Ju.P. Perevedencev, V.V. Sokolov, Je.P. Naumov i dr.; nauch. Red. M.A. Vereshhagin. Kazan': Kazan. un-t. 2013. 274 s.
 13. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitija sovremennyh processov prirodno-antropogennoj jerozii na Russkoj ravnine / Pod. red. d.g.n. V.N. Golosova, d.g.n. O.P. Ermolaeva. — Kazan': Izd-vo AN RT. 2019. 372 s.
 14. Prjahina S.I. Monitoring klimata Saratovskoj oblasti / S.I. Prjahina, Ju.N. Fridman, M.Ju. Vasil'eva // *Izvestija Saratovskogo universiteta*. 2006. T. 6. Serija Nauki o Zemle, vyp.1. S. 15–18.
 15. Ryzhov Ju.V. Formirovanie ovragov na juge Vostochnoj Sibiri. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo", 2015. 180 s.
 16. Sobolev S.S. Razvitie jerozionnyh processov na territorii Evropejskoj chasti SSSR i bor'ba s nimi / S.S. Sobolev. — M.: Izd-vo AN SSSR. 1948. 308 s.
 17. Stupishin A.V. Geograficheskij analiz ovrazhno-balochnyh sistem v predelakh Tatarskoj ASSR / A.V. Stupishin, V.N. Duglav, N.N. Lapteva. — Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta. 1980. 152 s.
 18. Usov N.I. Pochvy Saratovskoj oblasti. Ch.1. / N. I. Usov, prof. - Saratov : Oblgiz, 1948. 286 s.
 19. Frolova N.L. Vnutrigodovoe raspredelenie stoka ravninnyh rek Evropejskoj territorii Rossii i ego izmenenie / N.L. Frolova, M.B. Kireeva, S.A. Agafonova, V.M. Evstignejev, N.A. Efremova, E.S. Povalishnikova // *Vodnoe hozjajstvo Rossii*. 2015. № 4. S. 4–20.
 20. Cvetkov M.A. Izmenenie lesistosti Evropejskoj Rossii s konca XVII stoletija po 1914 god / M.A. Cvetkov. - M., Izd-vo Akad. Nauk SSSR. 1957. 213 s.
 21. Chibiljov A.A., Meleshkin D.S., Grigorevskij D.V. Sovremennoe sostojanie zemel' i sel'skohozjajstvennyh ugodij regionov stepnogo pojasa Rossii // *Voprosy stepovedenija*. 2021. № 2. S. 72–81.
 22. Jashkov I.A. Sostojanie izuchennosti ovrazhnoj jerozii na territorii Saratova i ego okrestnostej / I.A. Jashkov, A.S. Sheshnjov, A.V. Ivanov // *Izvestija Saratovskogo universiteta*. 2008. T. 8 (2). S. 30–35.
 23. Blong R.J., Graham O.P., and Veness J.A. The role of sidewall processes in gully development // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1982. № 7. P. 381–385.
 24. Bučko Š., & Mazúrová V. Gully erosion in Slovakia. *Water erosion in Slovakia* (Zachar, D. ed.). SAS Publishing, Bratislava. 1958. P. 68–101.
 25. Castillo C. and Gómez J.A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches // *Earth-Science Reviews*. № 160. 2016. P. 300–319.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
 26. De Foucault B., Colbeaux J.P., Bonnet T., Brac, P., Courtecuisse R., Debuyser M., Louche B. (1997). Les creuses de la region Nord/Pas-de-Calais: premiers resultats d'etudes multi-criteres. *Annales-société Geologique du Nord*. № 5. P. 385–394.
 27. Gawrysiak L., Harasimiuk M. Spatial diversity of gully density of the Lublin Upland and Roztocze Hills (SE Poland). *Annales UMCS, sec. B LXVII* (1). 2012. P. 27–43.
 28. Golosov V., Yermolaev O., Rysin I., Vanmaercke M., Medvedeva R., Zaytseva M. Mapping and Spatial-temporal Assessment of Gully Density in the Middle Volga Region. *Russia Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. 43(13). P. 2818–34.
<https://doi.org/10.1002/esp.4435>
 29. Ghimire S.K., Higaki D., 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.
 30. Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // *Catena*. 2006. № 68. P. 133–140.
 31. Józefaciuk C., Józefaciuk A. Struktura przestrzenna erozji wąwozowej w Polsce. *Pam. Puł.* 1983. 79.

32. Kertész A., Krecek J. Landscape degradation in the world and in Hungary. *Hungarian Geographical Bulletin*. 2019. № 68(3). P. 201–221.
<https://doi.org/10.15201/hungeobull.68.3.1>
33. Ohmori H., Speight J.G., 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. № 21. P. 65–84.
34. Platoncheva E., Yermolaev O., 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. № 10(5), 167. P. 17 <https://doi.org/10.3390/geosciences10050167>
35. Radoane M., Ichim I., Radoane N. Gully distribution and development in Moldavia, Romania. *Catena*. 1995. 24(2), 127–146.
36. Seginer I. Gully development and sediment yield // *Journal of Hydrology*. 1966. № 4. P. 236–253.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(66\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(66)90082-5)
37. Smith B.J. Effects of climate and land-use change on gully development: an example from northern Nigeria // *Zeitschrift für Geomorphologie*. 1982. № 44. P. 33–51.
38. Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Fernando J., Bezerra R., Bolysov S., Dvinskiy 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. № 154. P. 336–355.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
39. Vanmaercke M., Panagos P., Vanwalleghe T. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art, *Earth-Science Reviews*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>.
40. Yermolaev O., Medvedeva R., Poesen J. Spatial and temporal dynamics of gully erosion in anthropogenically modified forest and forest-steppe landscapes of the European part of Russia // *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022. V. 47. Is. 12. P. 2926–2940.
<https://doi.org/10.1002/esp.5433>
41. URL: <http://bassepr.kpfu.ru/> (data obrasheniya: 01.08.2022).
42. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/127-129.html?ysclid=18ft0aqone716051615> / (data obrasheniya: 01.09.2022).