

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4:632.125

РАЙОНИРОВАНИЕ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ В РЕГИОНЕ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

© 2023 г. Р. А. Медведева^а, * (ORCID: 0000-0003-3589-9688),
О. П. Ермолаев^а (ORCID: 0000-0001-6713-9996)

^аКазанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия

*e-mail: gregina8@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Приведена новая схема районирования овражной эрозии в крупном регионе России с использованием бассейнового и ландшафтного подхода. Автоматизированное ландшафтное районирование проведено средствами искусственных нейронных сетей с целью определения природно-антропогенных условий развития овражной сети. Эрозионное районирование реализовано на базе крупномасштабного геоинформационного картографирования оврагов методом визуального дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения за 2017–2021 гг. В качестве оперативно-территориальных единиц взяты бассейны малых рек (всего 1314) со средней площадью 91 км². На территории исследования идентифицировано 22688 оврагов (включая их отвершки), средняя длина которых – 65 м, а общая длина овражной сети около 1500 км. Средняя густота овражной сети по бассейнам составляет 12 м/км², достигая максимума в 301 м/км². При районировании в качестве показателя взята густота овражного расчленения, косвенно отражающая интенсивность оврагообразования в геопространстве. Доминирующими (84% всех бассейнов) являются районы либо с отсутствием овражного расчленения, либо имеющие слабую или очень слабую овражность. Главные причины повсеместного затухания овражной эрозии связаны с изменениями в землепользовании и в климатической системе, а также эволюционным фактором – переходом многих овражных форм в балочную стадию развития.

Ключевые слова: динамика овражности, автоматизированное районирование, геоинформационное картографирование, пространственный анализ

DOI: 10.31857/S0032180X23600671, **EDN:** UKANWE

ВВЕДЕНИЕ

Первая тематическая карта овражно-балочных систем России была составлена Козьменко в начале XX в. [2]. В конце 1940-х гг. под руководством С.С. Соболева создается карта густоты овражно-балочных систем для территории европейской части СССР. Для ее составления обрабатывались листы 10-верстной карты (масштаб 1 : 420000), изображавшие овражно-балочные формы на этом уровне генерализации. Измерения протяженности овражно-балочных систем велись с помощью курвиметра и лупы [25]. Пространственное развитие и районирование овражной эрозии на территории бывшего СССР и России (в том числе региона Среднего Поволжья) с картографическим обобщением результатов проведено рядом исследователей [5, 10, 16, 18, 20, 22, 28]. Для этих целей чаще всего использовались топографические карты разных масштабов (1 : 420000, 1 : 100000, 1 : 50000 и 1 : 25000). Как правило, для больших территорий обобщение данных по

овражному расчленению проведено на основе работ, выполненных по ключевым участкам или так называемым морфологическим районам. Таким методом были составлены карты густоты и плотности оврагов на всю территорию России в масштабе 1 : 8000000 и на территорию европейской части России в масштабе 1 : 2500000 [525].

Территория Среднего Поволжья с точки зрения интенсивности развития овражной эрозии физико-географами и геоморфологами всегда относилась к региону с интенсивной почвенной и овражной эрозией, так называемому “эрозионному полюсу” России. Результаты исследований по овражности этого региона имеют длительную историю, уходящую корнями в середину прошлого столетия. Изучение оврагов, в том числе их картографирование с использованием топографических карт, отражены в работах [7, 8, 26]. Значительно реже для целей картографирования, из-за трудоемкости и отсутствия в свободном доступе, привлекались данные дистанционного зондиро-

вания Земли (крупномасштабные аэрофотоснимки М 1 : 17 000—1 : 25 000). Масштабная работа как по охвату территории, так и по детальности была проведена Казанскими географами под руководством А.П. Дедкова в 1980-х гг. на востоке Русской равнины [19]. Оценка овражности осуществлялась по элементарным бассейнам (водосборам рек второго-третьего порядка и их межприточных пространств) в пределах крупных физико-географических районов. К сожалению, карты районирования овражной эрозии на этот регион не было сделано, а результаты в значительной степени устарели, поскольку картографирование проводилось по аэрофотоснимкам 1950–1970-х гг. С использованием этих данных первая карта эрозионного районирования региона Среднего Поволжья была составлена только в начале 2000-х гг. [7, 8]. Таким образом, существующие карты районирования овражности на территорию исследования выполнены либо с высоким уровнем генерализации, либо отражают ситуацию с развитием этого экзогенного процесса 50–70-летней давности. Внедрение геоинформационных технологий в тематическое картографирование и пространственный анализ, а также появление в начале 2000-х гг. в свободном доступе космических снимков высокого разрешения позволяет вернуться к изучению современного овражного расчленения больших территорий. Для этого есть ряд причин: во-первых, произошедшие изменения в климатической системе после 1980-х гг.; во-вторых, существенная трансформация типов землепользования и системы хозяйствования вслед за исчезновением с геополитической арены СССР; в-третьих, это временной фактор, определяющий естественную морфолого-генетическую эволюцию овражных форм.

В настоящее время завершены работы по геоинформационному картографированию современной овражной эрозии с использованием космических снимков высокого разрешения, не уступающих аэрофотоснимкам по детальности и возможностям отображения линейных форм эрозии на склонах [12, 17, 31].

Основной целью исследования является типологическое районирование современной овражной эрозии в регионе Среднего Поволжья с использованием бассейнового подхода и определение природно-антропогенного фона их развития.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Регион исследования относится к части Среднего Поволжья (рис. 1), включает в себя три субъекта РФ (Чувашию, Татарстан и Ульяновскую область) общей площадью 123,3 тыс. км². Широкими долинами р. Волги и ее самого крупного притока — р. Камы — вся территория делится на четыре неравных по площади физико-географических рай-

она. Самый крупный из них — Предволжье, далее, в порядке убывания площади, следуют Закамье, Предкамье и Заволжье.

Ландшафтные условия развития овражной эрозии. Поскольку овражная эрозия — многофакторный процесс, для выявления пространственных закономерностей ее развития необходимым условием является оценка природно-антропогенного фона территории. Для решения этой задачи проведено комплексное физико-географическое районирование региона Среднего Поволжья.

При любом тематическом районировании различают типологический и региональный подходы. При типологическом подходе учитываются наиболее существенные признаки, характерные для определенного таксономического уровня районов [1, 14], и опускаются многие частные их особенности. В этом случае характеристика дается не каждому контуру, а группе контуров, относящихся к данному типу. Региональный подход предполагает такую дифференциацию территориальных единиц, каждая из которых выделена на основе принципа однородности и характеризуется ясно выраженной индивидуальностью, а их свойства не проявляются в смежных районах [21]. В настоящем исследовании осуществляли типологическое районирование с целью выделения однородных по набору признаков территориальных единиц в ранге района. На региональном уровне в условиях Восточно-Европейской равнины развиты три основных типа природно-территориальных структур: 1) ячеистый (физико-географические и геоморфологические области и провинции); 2) изопотенциальный, с векторными полями (биоклиматические зоны и подзоны); 3) бассейновый тип [15]. В качестве единиц пространственного районирования и структурно-функционального анализа использовали бассейны малых рек, каждый из которых имеет четко выраженное местоположение в геопространстве и в пределах которых определялась густота овражного расчленения.

При районировании соблюдали следующие основные принципы. Во-первых, его проводили с учетом вещественно-морфологических признаков, отражающих важнейшие закономерности пространственной изменчивости ландшафтных условий, обусловленных взаимодействием как зональных, так и а зональных природных факторов. Во-вторых, соблюдали требование соразмерности выделяемых на каждой ступени районирования территориальных комплексов, которые должны быть отнесены к одному рангу. В-третьих, районирование осуществляли по принципу снизу—вверх, т.е. от частного к общему.

Территория Среднего Поволжья неоднократно служила объектом ландшафтного (физико-географического) районирования. Об этом сви-

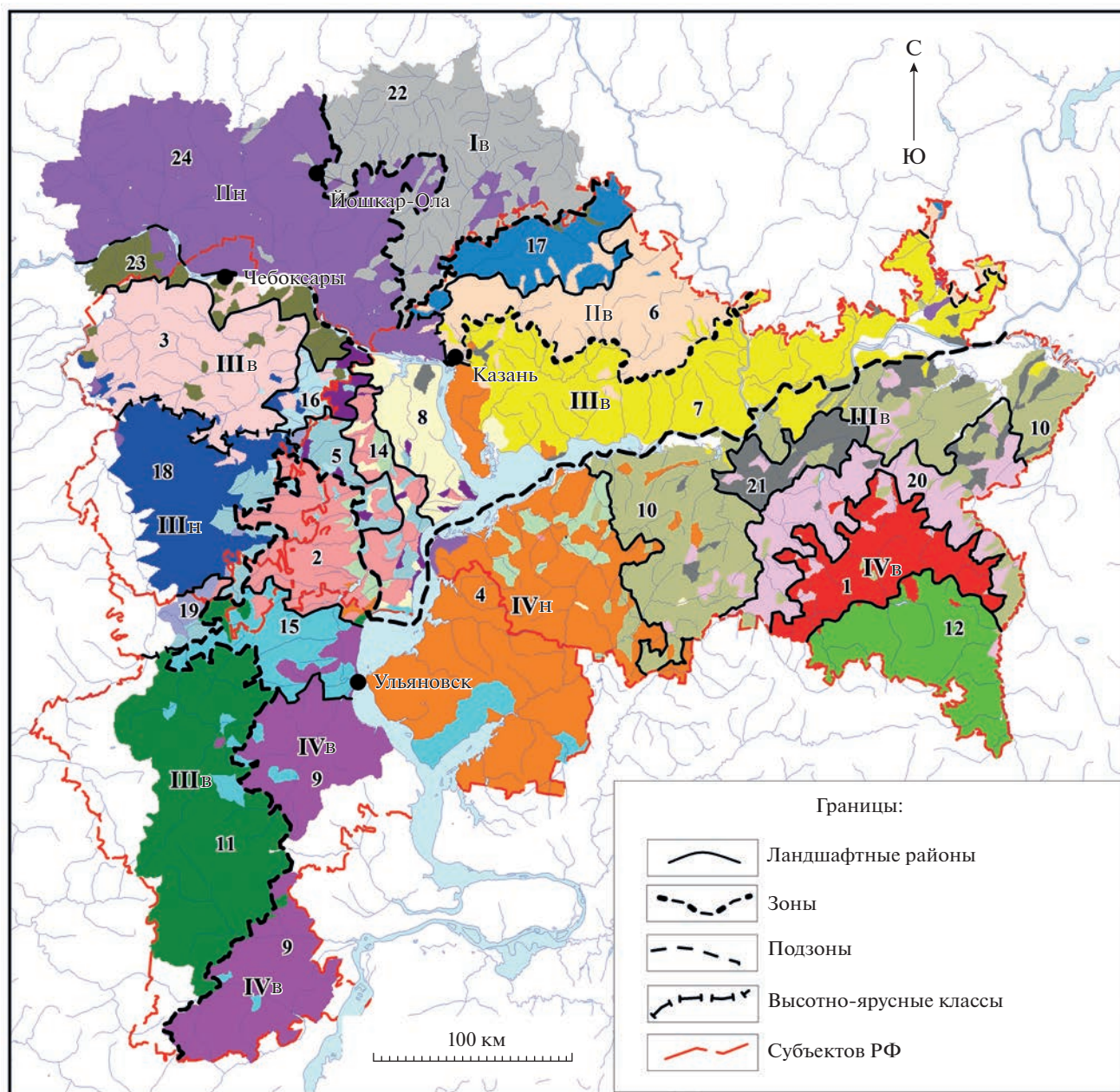


Рис. 1. Ландшафтное районирование Среднего Поволжья. Условные обозначения: I – бореальная умеренно-континентальная (южно-таежная); II – бореальная умеренно-континентальная (подтаежная); III – суббореальная северная семигумидная (широколиственная); IV – суббореальная северная семигумидная (лесостепная); н – подкласс низменных равнин; в – подкласс возвышенных равнин; цифрами обозначены номера ландшафтных районов (табл. 1).

детельствуют существующие схемы районирования [26, 14, 23]. Большинство авторов признают, что во внутризональной дифференциации ландшафтов существенную, часто решающую роль играют геолого-геоморфологические условия, являющиеся факторами азональными. Особенно это заметно на нижних ступенях ландшафтной классификации, когда литоморфный фактор является определяющим критерием при выделении родов и видов ландшафтов. Во всех существую-

щих схемах районирования наиболее спорным вопросом остается проведение зональных и подзональных ландшафтных границ, отличающихся наибольшей сложностью в условиях сочетания дискретных и континуальных типов границ (в данном исследовании это стык лесной и лесостепной зоны).

В предлагаемой схеме ландшафтного районирования по возможности наиболее полно учтены

не только факторы, непосредственно влияющие на эрозию, но также условия, оказывающие на нее опосредованное воздействие. На этапе формирования системы приоритетными были признаки, имеющие достаточное разнообразие своих значений и доступные для измерения с целью получения массового дискретного материала. Учитывали как зональные, так и региональные факторы территориальной дифференциации. При информационной оценке геокомплексов регионального уровня использовали известный принцип “черного ящика”. В соответствии с ним в качестве входных параметров, определяющих пространственную дифференциацию ландшафтов, отобраны ландшафтно-геофизические, геолого-геоморфологические и биотические признаки. Например, в качестве ландшафтно-геофизических признаков выступали: годовая суммарная радиация; модуль среднегодового половодного и годового стока; эрозионный индекс дождей осадков максимальной 10- и 30-минутной интенсивности; гидротермический коэффициент; коэффициенты стока и континентальности климата; максимальная высота снежного покрова; подземный и поверхностный речной сток; годовая сумма осадков; сумма осадков за теплый период года; валовое увлажнение территории; запасы воды в снежном покрове; радиационный баланс; сумма биологически активных температур. В состав геолого-геоморфологических признаков включены такие характеристики, как густота долинного расчленения; гранулометрический состав почвенного покрова; состав подстилающих горных пород; средняя крутизна бассейнов; глубина эрозионного расчленения; средняя длина склонов речных долин и балочной сети; распределение рельефа по ступеням абсолютных высот; минимальная, максимальная, средняя высота и среднеквадратичное отклонение абсолютных высот в бассейне; запасы и содержание гумуса в почвенном покрове; мощность чехла делювиально-солифлюкционных суглинков. Первичная продуктивность ландшафтов включена в биотический блок и рассматривалась как интегральный ландшафтно-геофизический показатель функционирования геосистем.

К выходному блоку геокомплексов регионального уровня отнесены такие показатели, как густота балочной сети, подтипы почвенного покрова; лесистость и залуженность бассейнов. Эти параметры позволяют проводить зонально-региональную индикацию видов ландшафтов и являются их важными диагностическими признаками.

Таким образом, для целей ландшафтного районирования региона привлечено более 40 различных показателей. Источники формирования этой геобазы данных ранее опубликованы [9].

Использованная методика автоматизированного выделения однородных районов, благодаря детальности и многоаспектности исходной информации, соответствующей речному бассейну и объединению признаков от частного к общему, позволила уйти от субъективного подхода в генерализации результатов, возникающей при “ручном” методе районирования. В качестве метода районирования были привлечены искусственные нейронные сети [30] с первоначальной разбивкой всей выборки на 121 класс. Такое количество классов в дальнейшем позволяет, используя методы иерархической классификации, сгруппировать большое количество классов в обозримые для анализа гомогенные группы или районы. Территория районирования в северной части региона Среднего Поволжья была несколько расширена. Связано это с необходимостью более точного установления границы южной части лесной зоны, поскольку здесь проходит зональная граница, разделяющая два биоклиматических пояса умеренных широт: бореальный (таежно-лесной) и суббореальный (лесостепной и степной). После выделения ядер и последующей процедуры слияния классов в регионе был выделен 21 ландшафтный район (рис. 1). Полученные ландшафтные рубежи соответствуют границам районов, извилистость которых определяется конфигурацией речных бассейнов. При проведении зональных границ обобщали ареалы, состоящие из нескольких небольших по площади бассейнов, типологически однородных, но расположенных в отрыве от основного ядра района. Граница между бореальной и суббореальной зоной проведена с учетом распределения таких параметров, как сумма биологически активных температур (в полосе значений 2100–2150°C); годового радиационного баланса (1500–1550 Мдж/м²) [3]; радиационного индекса сухости (в полосе значений 1.0–1.05).

В соответствии с проведенным районированием территории исследования каждый выделенный район можно отнести к следующим высотно-ярусным классам и зонально-секторным типам ландшафтов:

- бореальные (восточноевропейские) умеренно-континентальные подтаежные возвышенные (районы 6, 17);

- суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) широколиственные возвышенные (районы 3, 5, 7, 8, 11, 14, 16, 19, 23);

- суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) широколиственные умеренно-континентальные низменные (район 18);

- суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) умеренно-континентальные лесостепные низменные (район 4);

- суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) умеренно-континенталь-

ные лесостепные возвышенные (районы 1, 2, 9, 10, 12, 15, 20, 21).

Основные характеристики ландшафтных условий региона, на фоне которых происходит развитие овражной эрозии, представлены в табл. 1. В почвенном покрове северной части региона на низменных, на полностью облесенных участках Чувашии и Предкамья Татарстана доминируют дерново-подзолистые (Albic Glossic Retisols (Abruptic, Loamic, Ochric)) почвы. Светло-серые лесные (Luvic Retic Greyzemis Phaeozems (Loamic)) почвы широко распространены в северной части Приволжской возвышенности и в Предкамье Татарстана. Из почв черноземного (Chernozems) ряда наибольшее развитие получили выщелоченные черноземы (Luvic Chernic Phaeozems and Luvic Chernozems) (604 бассейна), развитые в бассейнах рек центральной части Приволжской возвышенности и в Закамье Татарстана.

Методика анализа современного овражного расчленения. Картографирование современной овражной эрозии проведено методом визуального дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения за период 2017–2021 гг., которые предоставлены ресурсами Яндекс, Google, Bing, ESRI, Nokia. Для определения овражных форм по космическим снимкам была сформирована система дешифровочных признаков. Главные из них: а) характерная плановая форма с резкими, геометрически хорошо выраженными границами; б) плановая форма оврага, имеющая хорошо различимые границы; в) линейный и дендритообразный рисунок изображения с четко выраженной бровкой и тальвегом; г) косвенные признаки (тени, позволяющие определять поперечный профиль оврага; цвет и тон изображения, выраженные через наличие обнаженных, незадернованных участков). При дешифрировании и последующем картографировании овраги подразделяли по происхождению на первичные (склоновые и береговые) и вторичные (донные) овраги. Более подробно методика дешифрирования овражных форм изложена в ранее [11, 12, 29].

На основе полученных результатов с использованием бассейнового подхода (был взят ранее созданный слой бассейнов малых рек, размещенный на геопортале КФУ <http://bassepr.kpfu.ru/> [32]) выполнено картографирование современного овражного расчленения исследуемой территории. Для каждого бассейна (всего их 1314) вычисляли суммарную протяженность овражной сети, степень овражного расчленения территории, которую определяли по наиболее часто используемым показателям (густоте и плотности оврагов).

С использованием ГИС проведено районирование современной овражной эрозии на территории исследования. Для районирования овражной

эрозии на исследуемой территории были выделены следующие интервалы по густоте оврагов: 1) 0 (отсутствие оврагов); 2) до 5 м/км² (очень слабая); 3) более 5–20 м/км² (слабая); 4) 21–50 м/км² (умеренная); 5) 51–100 м/км² (сильная); 6) 101–500 м/км² (очень сильная). Каждому интервалу на карте соответствует определенный цвет. Отмечается, что при выделении районов с различной интенсивностью овражной эрозии, при их ранжировании исследователи, в отличие от используемых показателей овражности, не столь единогласны. Так, на наиболее известной из опубликованных карт овражной эрозии России [5] районы выделяются по другим интервалам: очень слабой заовраженности (менее 0.01 км/км²); слабой (от 0.01 до 0.02 км/км²); умеренной (средняя густота – 0.06 км/км²); значительной (средняя густота – 0.3 км/км²); сильной (средняя густота – 0.9 км/км²) и очень сильной (густота – более 1.3 км/км²). Эта карта районирования отражает развитие оврагов 30–40-летней давности и выполнена по другим методическим правилам и источникам. В частности, из-за использования в качестве источника топографических карт получены несколько завышенные значения показателей за счет отнесения к оврагам крупных промоин. Кроме того, в первый интервал нецелесообразно включать нулевые значения овражности. Логично при таких значениях отдельно выделить районы с полным отсутствием оврагов. Остальные градации овражности во многом близки к предлагаемой в настоящей работе классификации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарная протяженность овражной сети на исследуемой территории составила 1449 км, средняя длина оврагов – 65 м (табл. 2), а средняя густота оврагов для всей территории исследования – 31 м/км². Из всех овражных форм преобладающее большинство относится к склоновому типу – 88%. На береговые овраги приходится 7%, на донные – 5%.

Доминирующими (84% бассейнов) являются районы либо с отсутствием овражного расчленения, либо имеющие слабую или очень слабую овражность. Районы с очень сильной овражной эрозией встречаются лишь в 2% бассейнов (рис. 2, табл. 3).

Пространственное развитие оврагов и ландшафтные условия региона. Сильная и очень сильная овражная эрозия (рис. 3) практически повсеместно развита в Западном Предкамье на возвышенных ландшафтах подтаежной (районы 6, 17) зоны. Такая же овражность характерна для возвышенных широколиственных ландшафтов Предволжья и Предкамья Татарстана (районы 3, 5, 7, 8, 14, 16, 19, 23). Еще один район с сильной и очень силь-

Таблица 1. Осредненные показатели водного и теплового режима по ландшафтным районам

№ района на карте	Радиационный индекс сухости	Гидротермический коэффициент	Коэффициент континентальности	Годовая сумма осадков, мм	Поверхностный речной сток, мм	Запасы воды в снеге, мм	Сумма биологически активных температур, °С	Средняя крутизна, мин	Типы пород	Гранулометрический состав	Подтип почвы	Лесистость, %
Бореальные (восточноевропейские) умеренно-континентальные подтаежные возвышенные												
17	1.05	1.75	2.22	605	148	101	2061	68	1	0	3; 1	23.5
6	1.04	1.75	2.21	590	144	108	2143	91	1	0; 1	3; 1	11.9
Суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) широколиственные возвышенные												
8	1.14	1.72	2.22	611	113	93	2195	126	1	0	4; 3	19.7
16	1.05	1.82	2.10	622	135	80	2163	100	1	0	4	5.9
19	1.06	1.66	2.11	622	144	69	2297	172	3	0	4; 5	5.5
7	1.05	1.67	2.27	589	135	114	2191	87	1; 5	0; 1	3; 1	23.5
23	1.10	1.77	2.15	619	118	90	2190	164	1	0	3; 4	18.7
11	1.11	1.55	2.37	598	113	77	2304	259	4	0; 1	4; 5; 3	43
5	1.10	1.72	2.19	617	124	82	2241	100	1; 3	0; 2	4; 6	12.3
14	1.08	1.62	2.16	615	114	85	2256	54	5	0	6	11.3
3	1.07	1.84	2.10	625	155	91	2208	109	1; 3	0; 2	3; 4	16.5
Суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) широколиственные умеренно-континентальные низменные												
18	1.03	1.79	2.10	632	158	90	2242	79	6; 3	0; 3	1	70.7
Суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) умеренно-континентальные лесостепные низменные												
4	1.14	1.56	2.25	615	108	79	2285	4	48	0; 1	6; 5	24.3
Суббореальные северные семигумидные (восточноевропейские) умеренно-континентальные лесостепные возвышенные												
1	1.15	1.54	2.45	567	109	87	2183	155	1; 2	0	6; 8	29.4
2	1.13	1.68	2.25	608	110	75	2263	69	3; 1	0; 2	6	5.2
9	1.22	1.38	2.25	564	85	84	2412	318	4; 3	0; 1	6; 9; 5	21.4
20	1.14	1.53	2.45	575	113	81	2190	123	1; 5	0	6; 8	23.6
21	1.09	1.57	2.39	588	121	88	2181	108	1; 5	0	4; 3	27.0
12	1.13	1.61	2.19	616	108	99	2128	143	1; 2	0	6; 8	23.4
15	1.16	1.52	2.30	595	101	67	2314	141	3; 4	0; 1	6; 8	13.1
10	1.10	1.54	2.35	587	118	87	2195	56	5; 1	0	6	13.8

Примечание: По районам 22, 24 характеристики не приводятся, так как они выходят за пределы территории исследования.
Типы пород: 1 – глинисто-мергельная и глинисто-известняковая пачка татарского яруса, белевской свиты и уфимского яруса пермской, триасовой систем (P_2^{1-3}); 2 – известняки и доломиты карбона и перми ($P_2^{K_2}$); 3 – песчано-глинистые образования юры и нижнего мела (J_3-K_1); 4 – мел-мергельная и песчано-кремнистая толща верхнего мела и палеогена (P_g-K_2); 5 – песчано-углинистая пачка неогена и плейстоцена (N–Q); 6 – пески и супеси неогена и плейстоцена (Q_n). На первом месте стоят индексы, соответствующие частоте встречаемости пород данного типа не менее 60%.
Преобладающий гранулометрический состав: 0 – глинистые и тяжелосуглинистые; 1 – среднесуглинистые; 2 – легкосуглинистые; 3 – супесчаные.
Подтипы почв: 1 – дерново-подзолистые (Albic Glossic Retisols (Abruptic, Loamic, Ochric)); 2 – дерново-карбонатные (Eutric Rendzic Mollic Leptosols); 3 – светло-серые лесные (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)); 4 – серые лесные (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)); 5 – темно-серые лесные (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)); 6 – черноземы выщелоченные (Luvic Chernic Phaeozems and Luvic Chernozems); 7 – черноземы оподзоленные (Luvic Greyzemic Chernic Phaeozems); 8 – черноземы типичные (Haplic Chernozems (Pachic)); 9 – черноземы типичные карбонатные (Haplic Chernozems (Pachic)).

Таблица 2. Количество оврагов и суммарное распределение длин

Параметр	Склоновые	Береговые	Донные	Сумма
Количество овражных форм, ед.	19861	1628	1179	22668
Общая сумма длин, км	1287	22.9	139.2	1449.1
Средняя длина, м	65	14.1	118.1	—

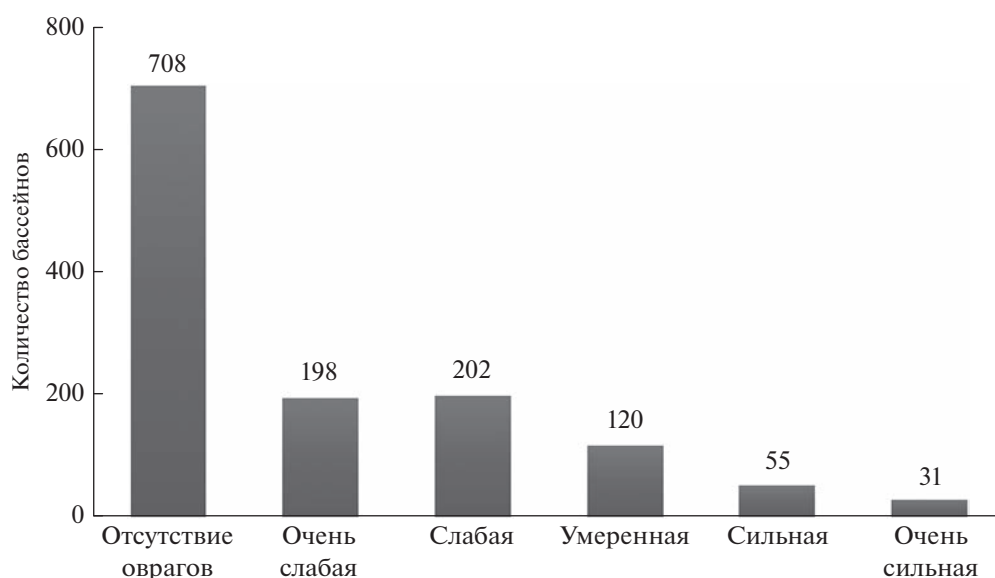
Таблица 3. Статистические показатели густоты оврагов в эрозионных районах

Параметр	Густота оврагов, м/км ²				
	>0–5	>5–20	21–50	51–100	101–500
Среднее значение	2.1	11.4	32.5	67.4	161.8
Медиана	1.9	10.9	32	65.1	137.5
Среднеквадратичное отклонение	1.4	4.4	8	13.3	60.4

ной овражностью находится в Предволжье Ульяновской области в суббореальных возвышенных лесостепных ландшафтах района 9. Здесь овраги возникают на крутых склонах, имеющих самые высокие по региону значения крутизны (более 5°) и развития хорошо размываемых песчано-глинистых образований юры, нижнего мела, мел-мергельных и песчано-кремнистых пород верхнего мела и палеогена. Овраги размывают выщелоченные, оподзоленные и типичные карбонатные черноземы (Luvic Chernic Phaeozems and Luvic Chernozems, Naplic Chernozems (Pachic)). Локально (на севере ландшафтного района 11) сильная овражность также встречается в подклассе возвышенных ландшафтов на южном крыле подзоны широколиственных лесов с высокими значениями средней крутизны склонов (4.5°) на мел-мер-

гельных и песчано-кремнистых породах верхнего мела и палеогена. Размываются светло-серые и серые лесные (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) почвы. Но в этом районе овраги полностью пропадают в центральной и западной частях в условиях сплошной залесенности, имеющих один из самых высоких показателей средней лесистости (43%) (табл. 4, рис. 4).

Районы с умеренной овражной эрозией в целом повторяют пространственные закономерности их развития от ландшафтных условий, которые характерны для сильной и очень сильной овражности. Наибольшее развитие умеренной овражности проявляется в подтаежных ландшафтах в восточной части района 6, на юге — в широколиственных лесных (район 5) и лесостепных возвышенных ландшафтах (районы 2 и 15).

**Рис. 2.** Распределение бассейнов по степени проявления овражной эрозии.

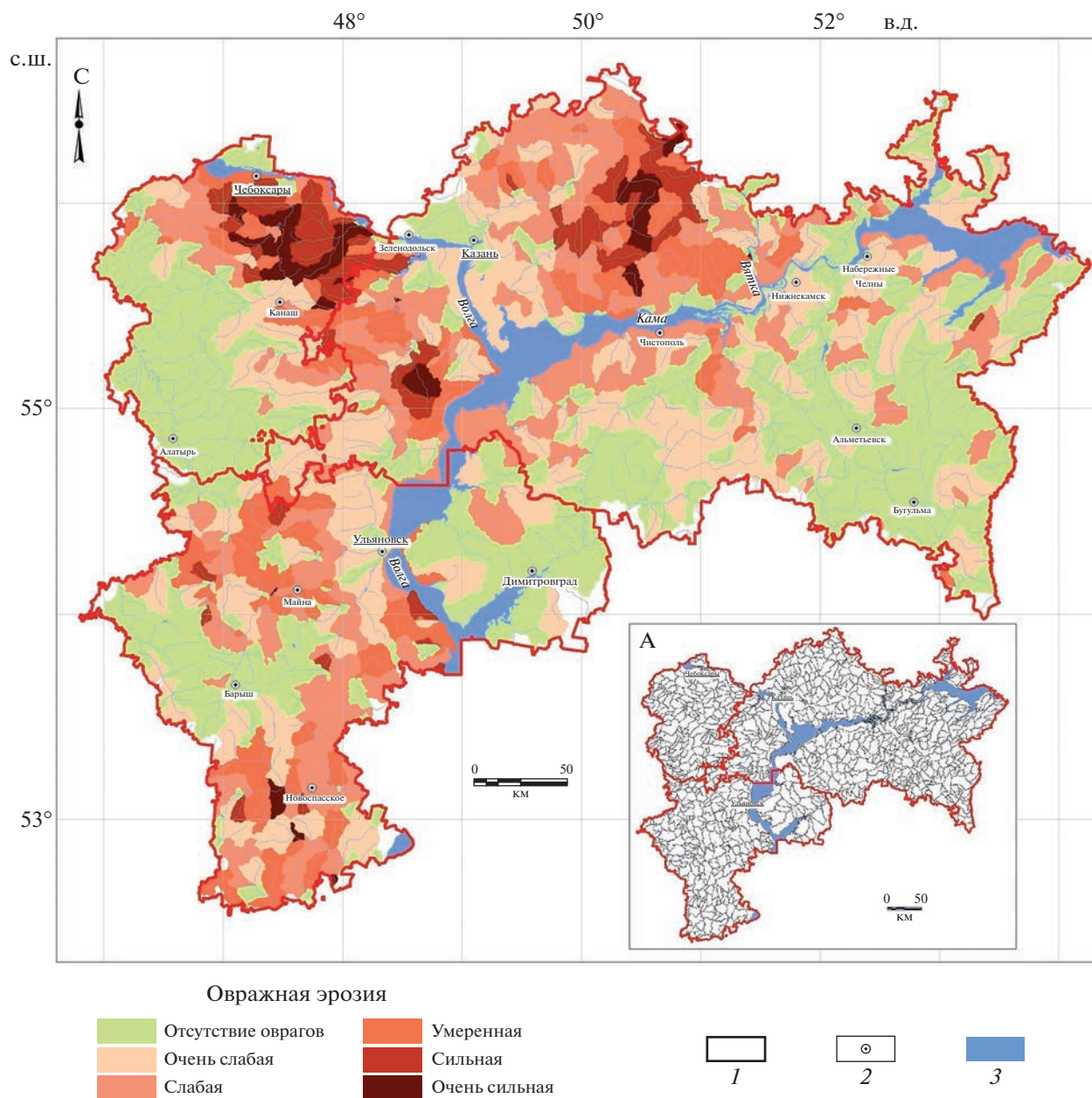


Рис. 3. Районирование современной овражной сети на территории исследования: 1 – границы Республики Татарстан, Чувашии и Ульяновской области, 2 – населенные пункты, 3 – водные объекты; А – границы бассейнов малых рек.

Общий фон интенсивности овражной эрозии резко снижается в лесостепной зоне на левобережной части долин Волги и Камы вне зависимости от подкласса ландшафтов. Здесь, как правило, на террасовом комплексе этих крупных рек расположены районы с умеренной овражностью. Даже в ландшафтном районе 12, приуроченном к Бугульмино-Белебеевской возвышенности, доминирует *очень слабая овражность или овраги полностью отсутствуют*. Несмотря на высокую крутизну склонов, проявления овражной эрозии здесь локальны благодаря довольно большой за-

лесенности (23.4%), сохранившейся на нераспаиваемых склонах возвышенности с трудноразмываемыми известняками и доломитами карбона и перми.

Таким образом, пространственное развитие оврагов, в целом хотя и подчиняется ландшафтным условиям, в которых они формируются, но не обнаруживает черт зональности, поскольку ключевые факторы оврагообразования – рельеф и состав горных пород – по своей сути в геопространстве азональны. Гидроклиматические условия, формирующие поверхностный сток и эрозию,

Таблица 4. Природно-антропогенные условия развития оврагов в бассейнах [33]

Параметр	Густота оврагов, м/км ²					
	0	>0–5	>5–20	21–50	51–100	101–500
	отсутствие оврагов	очень слабая	слабая	умеренная	сильная	очень сильная
Общая площадь, км ²	47149	28218	24076	12807	5031	2572
Средняя площадь, км ²	66.6	142.5	119.2	106.7	91.5	83
Средняя протяженность овражной сети, м	0	292	1325	3427	6086	12258
Количество вершин оврагов	0	1049	4186	6149	5569	5742
Средняя высота, м	138	155	150	164	150	140
Средняя крутизна склонов, град	1.63	1.71	1.73	1.92	1.85	2.04
Эрозионный потенциал рельефа	0.72	0.72	0.72	0.82	0.76	0.90
Среднее годовое количество, мм	522	524	525	522	530	528
Среднее количество осадков за холодный период года, мм	162	163	163	159	162	160
Среднее количество осадков за теплый период года, мм	360	361	362	363	368	368
Лесистость, %	27.4	21.4	15.3	18.3	9.6	7.6
Распаханность, %	31.1	46.5	49.2	45.7	49.8	43.2
Залуженность, %	36.6	30.5	33.9	34	38.8	47.7
Модуль стока воды, м ³ /(с км ²)	0.0036	0.0037	0.0036	0.0037	0.0038	0.0038
Годовой слой стока воды, мм	113	116	113	116	119	120

наоборот, зональны. Но в пределах исследуемого региона, включающего южную оконечность бореальных лесов и часть лесостепной зоны, — изменяются не столь контрастно как геолого-геоморфологические условия, чтобы придать процессу оврагообразования черты зональности.

Динамика развития овражной эрозии. Современная овражность региона в целом коррелирует с районами различной густоты овражного расчленения полувековой давности [10, 19, 31] с той лишь разницей, что почти для всех районов в настоящее время этот показатель, как минимум, сократился на порядок. Например, современная густота овражного расчленения по сравнению с густотой 1950-х гг. в Татарстане уменьшилась в среднем на 230 м/км². В пределах Предволжья наибольшая густота оврагов была в Предволжье Ульяновской области. Заметное уменьшение овражности отмечается в Восточном Предкамье на территории Татарстана, тогда как более полувека назад здесь были овражные районы с густотой расчленения, характерной для Западного Предкамья.

Важную роль в динамике развития овражной эрозии играют изменения в землепользовании территории. Например, причиной высоких скоростей роста отдельных оврагов в пределах Восточного Закамья Татарстана, несмотря на значи-

тельную залесенность этой части, является более позднее освоение территории (вырубка лесов, распашка земель, интенсивная эксплуатация недр при добыче нефти и газа), а, значит, более позднее по сравнению с другими районами заложение оврагов [19]. Отличия Восточного и Западного Предкамья, выявленные современными исследованиями, также можно объяснить переводом пашни в категорию земель, занятых промышленными объектами (создание свободной экономической зоны “Алабуга” в Восточном Предкамье), что привело к резкому уменьшению числа активно растущих оврагов.

Оценка изменений землепользования и ее роль в динамике овражности проведена для части территории (регион Предволжья и Западного Предкамья Татарстана) в 458 бассейнах общей площадью более 20 300 км² с использованием архивов сканерных снимков системы Landsat. Проведенная оценка изменений землепользования в 2019 г. относительно 1985 г. показала сокращение площади пашни почти на 10%, при этом доля лесов выросла на 40.9%, а сенокосы и пастбища сократились 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

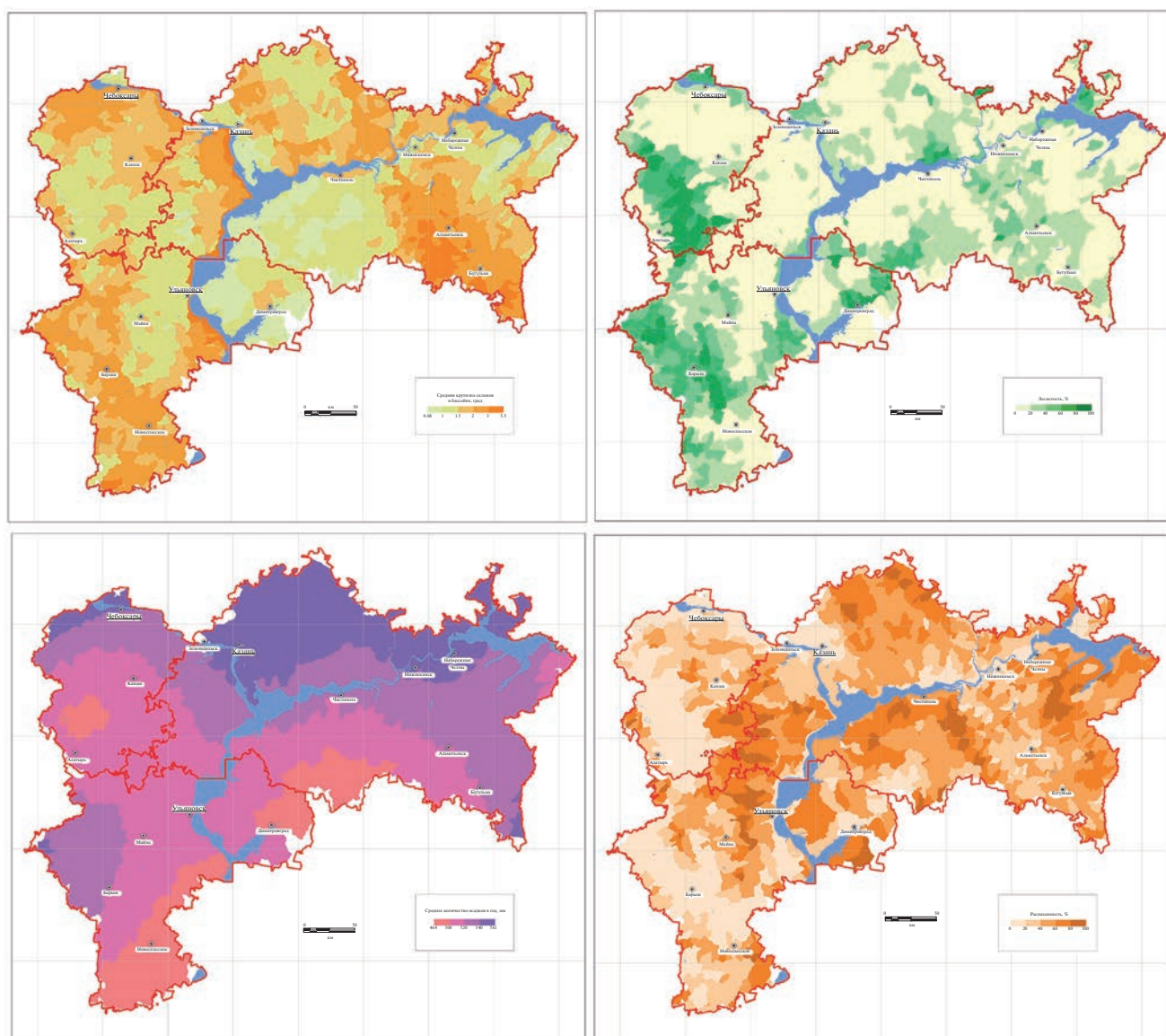


Рис. 4. Природно-антропогенные условия развития оврагов в бассейнах [33].

попадают в категорию лугов, 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) [12]. Возможно, что роль динамики землепользования на овражность территории становится заметна при более существенных изменениях этих параметров. Сказывается на результатах статистического анализа и методический подход. Все показатели так же, как сама овражность выражены осредненными значениями для территории всего бассейна. А оврагообразование — это очень локализованный в

геопространстве процесс. Поэтому для более подробного анализа был выбран тестовый бассейн, расположенный в пределах Предволжья и относящийся к району с очень сильной овражной эрозией. Показатель густоты оврагов в его пределах уменьшился в 2.3 раза за 50-летний период (табл. 5). Площадь пашни с 1985 г. сократилась примерно на столько же, на сколько увеличилась площадь, занятая лугами и лесом.

На рис. 5 представлены аэрофотоснимок (1969 г.) и космический снимок (2022 г.) фрагмента территории исследуемого бассейна, анализ которых подтверждает результаты оценки изменений землепользования. За прошедший период сформирована лесозащитная полоса, пересекающая пашню в центральной ее части. Отчетливо про-

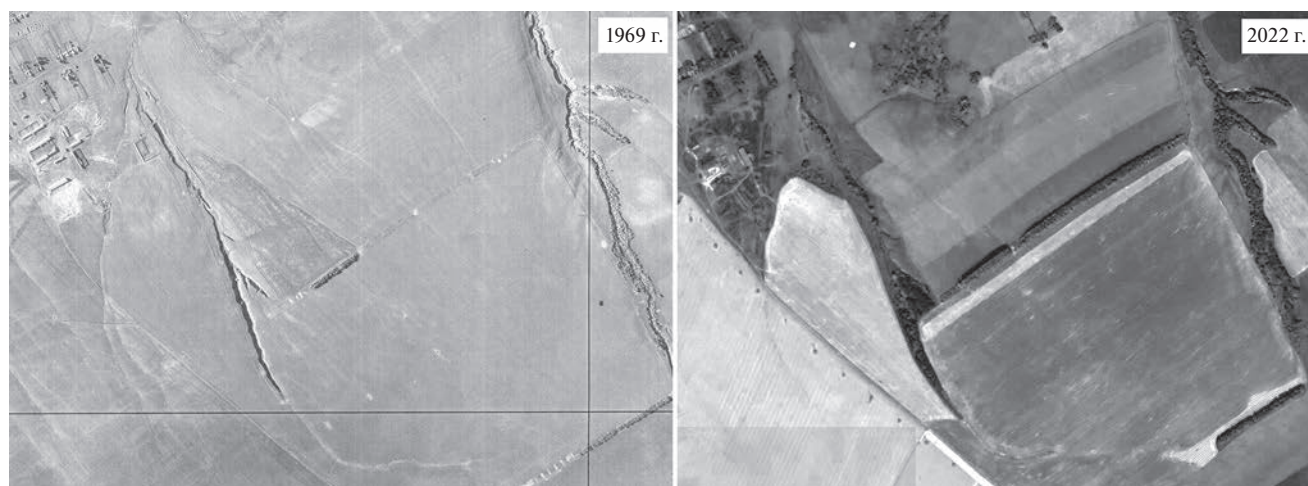


Рис. 5. Изменения овражной сети за период 1969 г. (фрагмент АФС) по 2022 г. (фрагмент космического снимка) на территории Республики Татарстан (с. Ямбухтино, 55°04'10" N, 48°44'43" E).

слеживается изменение состояния эрозионных форм, граничащих с пашней. На снимке 1969 г. овраги имеют хорошо выраженную бровку, тальвеги и незадернованные склоны. Снимок 2022 г. свидетельствует о прекращении активной фазы их роста: эрозионные формы покрыты древесно-кустарниковой растительностью, тальвеги не выражены, фаза активного роста оврагов завершена. Следует также отметить изменения пахотных земель в сторону уменьшения их площадей. Вполне очевидным является тот факт, что за последние 53 года здесь произошло затухание овражной эрозии. Бывшие овраги различного типа, по сути, трансформировались в балочные формы. Редуцирование оврагов, представленных на этом фрагменте территории, произошло благодаря противоэрозионному эффекту лесных насаждений, а также уменьшению площади пашни и залужению оврагов. Подобная тенденция характерна и для других территорий интенсивного земледелия европейской части России. Например, для юга Среднерусской возвышенности (Белгородская область) в 63 овражно-балочных системах, суммарной площадью 10310.2 га, проведены исследования на основе разновременных спутниковых данных 1970 и 2014–2015 гг. по детальному пространственному анализу изменений в площади и расположении лесов [27]. В частности, установлено, что лесистость исследуемых овражно-балочных систем, типичных для региона, за последние полвека выросла с 3.6 до 22.7%, т.е. в 6.3 раза. Эти данные также могут свидетельствовать о стабилизации и затухании оврагообразования.

Овраги возникают благодаря концентрации поверхностного склонового стока. Изменения, происходящие в периоды талого и ливневого стока, безусловно, — важнейший фактор как заложения новых, так и динамики развития существую-

щих оврагов. Поэтому еще одной главных причин, определяющих динамику овражности, являются изменения в климатической системе. Например, в регионе наблюдается тенденция к увеличению среднемесячных температур воздуха зимой. При этом наиболее быстрыми темпами уменьшается суровость в январе [6]. Все это приводит к уменьшению глубины промерзания почвы и, как следствие, снижению показателей талого стока. Отмечено, что в 1950–1970-х гг. на территории исследования самый значительный линейный прирост оврагов наблюдался в период талого стока. Но в настоящее время по многолетним данным полевого мониторинга роста оврагов на территории Удмуртии из-за 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 4 раза темпов роста оврагов по сравнению с 1978–1997 гг. [24]. За последние десятилетия существенно изменились объемы талого склонового стока. Косвенно об этом можно судить по величине запасов воды в снеге (табл. 6). Самое значительное уменьшение запасов воды в снеге (а значит и объемов талого стока) наблюдается в лесной и лесостепной зонах

Таблица 5. Характеристики исследуемого бассейна [12, 31]

Площадь бассейна, км ²	52
Густота оврагов (1970-е гг.), м/км ²	507
Густота оврагов (2017–2021 гг.), м/км ²	222
Изменение площади пашни с 1985 по 2019 гг., %	–5.3
Изменение площади леса с 1985 по 2019 гг., %	2.1
Изменение площади луга с 1985 по 2019 гг., %	3.4

Таблица 6. Изменения запасов воды в снеге в сельскохозяйственной зоне европейской части России за период 1960–1980 и 2006–2021 гг. (% от 1960–1980 гг.) [31]

Природная зона	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	СКО*
Лесная	22	24	–12	100	11
Лесостепная	17	18	–22	46	12
Степная	17	14	–48	60	17

* СКО – среднеквадратичное отклонение.

(24 и 18% соответственно). По всей видимости, масштабное редуцирование овражной сети, произошедшее в бассейнах в северной и юго-западной частях региона, во многом обусловлено именно этим фактором.

В теплый период года для возникновения и регрессивного роста оврагов существенное значение играет не общий слой осадков, а их интенсивность. Она выражается так называемым эрозионным потенциалом осадков (или R-фактором). Для региона проведены исследования изменчивости во времени и пространстве эрозионного потенциала осадков максимальной 10-минутной интенсивности за период 1966–2019 гг. [31]. Исследованный 53-летний временной интервал был разбит на два примерно равных периода (1966–1990 и 1991–2019 гг.). Для каждого периода рассчитаны средний многолетний годовой R-фактор и средние многолетние месячные значения R-фактора на метеостанциях, а также относительная разница среднего многолетнего значения коэффициента за второй период по сравнению с рассчитанным средним многолетним значением за первый период. Картографическое отображение среднегодового изменения эрозионной активности осадков между этими двумя периодами для исследуемой территории носят сложный и разнонаправленный характер. На западе и востоке региона наблюдается незначительное (10%) увеличение R. Но здесь густота овражного расчленения и ранее была слабой и очень слабой. В анализируемые периоды на значительной части изучаемой территории выделяется четко выраженная меридионально вытянутая вдоль долины р. Волги область, где R-фактор уменьшился на 10–30%. Однако именно к этой области приурочены районы с сильной и очень сильной овражной эрозией. В то же время, при наложении на эту область карты овражности 50–70-летней давности, можно увидеть очень резкое сокращение густоты овражного расчленения от 200–800 м/км².

Все приведенные причины сокращения овражности, на наш взгляд, достаточно дискуссионные и все еще требуют своего подтверждения. В то же время ключевым фактором существенно сокращения овражной сети, возможно, является эволюционный. Достигнув пика активного развития и состояния динамического равновесия

в середине XX в., овраги переходят в балочную стадию. А изменения в землепользовании и в климате (в первую очередь, значительное уменьшение талого стока) запустили механизм ускоренного перехода оврагов в балочные системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие овражной эрозии во многом определяется ландшафтными особенностями территории. Для выявления этих особенностей проведено автоматизированное комплексное физико-географическое (ландшафтное) районирование методом искусственных нейронных сетей. Использование этого метода, по сравнению с традиционным “ручным” методом комплексного районирования, позволяет учесть максимальное количество параметров. При традиционном районировании исследователь, как правило, работает максимум с 4–5 информационными слоями, тогда как нейросетевой метод может использовать всю доступную совокупность признаков. Кроме того, метод нейросетевого ландшафтного районирования имеет ряд преимуществ и перед традиционными статистическими методами моделирования. Главным его отличием является большое количество степеней свободы, позволяющее строить сколько угодно точные модели, а также способность к самообучению, т.е. коррекции собственной структуры и поведения с учетом вновь поступающих данных. Ценным качеством нейронных сетей является их способность к генерализации и обобщению, выражающаяся в построении удовлетворительных моделей по неполным или сильно искаженным данным.

В районе интенсивного земледелия региона Среднего Поволжья четко выделяется несколько географических центров локализации оврагов. Умеренное и высокое овражное расчленение компактными ареалами приурочено к правобережью долин рек Волги, Камы и Вятки. Овраги формируются в условиях возвышенного и расчлененного рельефа на хорошо размываемых глинисто-мергельных, песчано-мергельных отложениях перми и мел-мергельных и песчано-кремнистых отложениях мела. Лесостепная зона, расположенная к югу от левого склона долин рек Волги и Камы, а также почти вся западная часть региона

характеризуются очень слабым развитием оврагов или их полным отсутствием. На западе этому, в первую очередь, благоприятствует высокая (более 50%) лесистость. А на левобережных склонах долин Волги и Камы — повсеместное развитие устойчивых к эрозии черноземных (Chernozems) почв, пески и супеси неогена, слагающие террасы этих рек, а также плохо размываемые известняки и доломиты перми — на юго-востоке.

Большое значение в развитии овражной эрозии имеют проводимые природоохранные мероприятия и изменения в землепользовании. Перевод сельскохозяйственных земель в другие категории, прекращение распашки территории, восстановление леса представляют собой лимитирующие факторы роста оврагов и появления новых эрозионных форм.

Современная овражность региона с середины прошлого века существенно сократилась. Причиной редуцирования оврагов выступают произошедшие значительные изменения в землепользовании и в климатической системе, оказавшие влияние на параметры поверхностного склонового стока. Но ключевым фактором существенного сокращения овражной сети является эволюционный. Овраги в большинстве случаев завершают активную фазу своего развития и трансформируются в устойчивые к линейной эрозии балочные формы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование (методика, анализ данных, результаты) выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00025; <https://rscf.ru/project/22-17-00025/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975. 288 с.
2. Бондарев В.П. Инженерная геодинамика овражно-балочных систем. Обзорная информация. М.: Геоинформмарк, 1998. 61 с.
3. Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.
4. Бутаков Г.П. Динамика овражной и речной эрозии в конце XX века на территории Республики Татарстан // Современные и древние эрозионные процессы. Казань, 2001. С. 51–67.
5. География овражной эрозии / Под ред. Зориной Е.Ф. М.: Изд-во МГУ, 2006. 324 с.
6. 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, 2010. 27 с.
7. Дуглав В.А. Изучение эрозионного расчленения и составление эрозионных карт по аэрофотоснимкам // Вопросы геоморфологии Среднего Поволжья. Уч. зап. Казан. ун-та, 1964. Т. 124. С. 22–30.
8. Дуглав В.А. Составление карт густоты эрозионной расчлененности рельефа // Итоговая научн. конф. КГУ за 1963 г., секция географических, геолого-минералогических наук. Казань, 1964. С. 10–11.
9. Ермолаев О.П. Геоинформационное картографирование эрозии почв в регионе Среднего Поволжья // Почвоведение. 2017. № 1. С. 130–144. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010075>
10. Ермолаев О.П. Эрозия в бассейновых геосистемах. Казань: Изд-во УНИПРЕСС, 2002. 264 с.
11. 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.
12. 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>
13. Зорина Е.Ф., Каташ И.Г., Любимов Б.П., Никольская И.И., Прохорова С.Д. Новые типы карт опасности овражной эрозии // Геоморфология. 1992. № 3. С. 25–31.
14. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высш. шк., 1991. 366 с.
15. Коломыц Э.Г. Полиморфизм ландшафтно-зональных систем. Пушкино, 1998. 311 с.
16. Косов Б.Ф., Константинова Г.С. Комплексная карта овражности равнинной территории СССР // Геоморфология. 1973. № 3. С. 3–9.
17. Медведева Р.А., Ермолаев О.П. Геоинформационное картографирование овражной сети (на примере ландшафтов Саратовской области) // Известия Русского географического общества. 2022. № 154. С. 3–21.
18. Миронова Е.А. Овражность территории СССР // Геоморфология. 1971. № 3. С. 25–35.
19. Овражная эрозия востока Русской равнины / Под ред. Дедкова А.П. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1990. 142 с.
20. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / Под. ред. Голосова В.Н., Ермолаева О.П. Казань: Изд-во АН РТ, 2019. 372 с.
21. Ретеюм А.Ю. Физико-географическое районирование и выделение геосистем // Вопросы географии. М.: Мысль, 1975. сб. 98. С. 5–27.
22. Рыжов Ю.В. Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2015. 180 с.

23. Рысин И.И. Овражная эрозия в Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 1998. 274 с.
24. 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.
25. Соболев С.С. Развитие эрозионных процессов на территории Европейской части СССР и борьба с ними. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 308 с.
26. Ступишин А.В., Дуглав В.Н., Лантеева Н.Н. Географический анализ овражно-балочных систем в пределах Татарской АССР. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1980. 152 с.
27. Терехин Э.А. Изменение лесистости овражно-балочных систем юга Среднерусской возвышенности за последние десятилетия // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер. Естественные науки. 2018. Т. 42. № 2. С. 223–230. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2018-42-2-223-230>
28. Физико-географическое районирование Среднего Поволжья / Под ред. Ступишина А.В. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1964. 197 с.
29. 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. V. 43. P. 2818–2834. <https://doi.org/10.1002/esp.4435>
30. Kohonen T. Self-Organising Maps. Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. 416 p.
31. 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. P. 2926–2940. <https://doi.org/10.1002/esp.5433>
32. Yermolaev O., Mukharamova S., Maltsev K., Ivanov M., Ermolaeva P., Gayazov A., Mozzherin V., Kharchenko S., Marinina O.A., Lisetskii F. Geographic Information System and Geoportal “River basins of the European Russia” // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 107. P. 012108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012108>
33. <http://bassepr.kpfu.ru/> (дата обращения: 01.11.2022).

Gully Erosion Zoning in the Middle Volga Region

R. A. Medvedeva^{1, *} and O. P. Yermolaev¹

¹Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environmental Sciences, Kazan, 420008 Russia

*e-mail: gregina8@mail.ru

The article presents a new scheme of zoning of modern gully erosion in a large region of the Russian Federation. Automated landscape zoning by means of artificial neural networks was carried out in order to determine the natural and anthropogenic conditions for the development of the gully network. Erosion zoning was implemented on the basis of large-scale geoinformation mapping of gullies by the method of visual interpretation of high- and ultra-high-resolution satellite images for 2017–2021. The basins of small rivers (1314 in total) with an average area of 91 km² are taken as operational-territorial units. 22688 gullies (including their holes) were identified in the study area, the average length of which is 65 m, and the total length of the gully network is about 1500 km. The density of the gully network averages 12 m/km², reaching a maximum of 301 m/km². The density of gully dissection is used as an indicator for the zoning of gully erosion, this indicator indirectly reflects the intensity of gully formation in geo-space. The dominant (84% of basins) are areas either with no gully dissection or having weak or very weak gully erosion. The main reasons for the widespread damping of gully erosion are related to changes in land use and in the climate system, as well as an evolutionary factor – the transition of many gully forms to the balka stage of development.

Keywords: gully dynamics, automated zoning, geoinformation mapping, spatial analysis