

DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-3-192-212

УДК 913.1/913.8

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЭРОЗИИ В БАССЕЙНАХ РЕК НА ЮГЕ СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

*Я.В. Павлюк, О.М. Саблина,
С.Б. Смирнова, К.А. Гладкая*

В настоящее время в связи с увеличенной антропогенной нагрузкой значительные территории нашей страны подвержены эрозионным процессам. Белгородская область не исключение, в связи с этим стало актуальным проведение исследований направленных на анализ пространственно-временных закономерностей развития линейной эрозии для оценки потенциальной устойчивости территории к ее проявлению. Анализ пространственного распределения эрозионных форм на территории исследования позволит выявить закономерности распределения и оценить возможное развитие эрозионных процессов. Целью исследования является анализ пространственно-временных закономерностей развития линейной эрозии для оценки потенциальной устойчивости территории к ее проявлению в рамках бассейновой концепции на территории Юга Среднерусской возвышенности используя геоинформационное моделирование в совокупности с натурными методиками исследования линейного развития эрозионной сети.

При проведении исследований использованы методы тематической обработки космических снимков, геопространственного анализа, ГИС-моделирования, сравнительно-географический, метод аналогий, ландшафтного планирования, а также методы статистической и математической обработки данных.

В результате исследования было выявлено, что территории с высокой плотностью эрозионной сети и низкой долей густоты речной сети имеют высокие значения густоты овражной сети при невысокой плотности оврагов; территории с невысокими значениями густоты эрозионной сети и более развитой речной сетью характеризуются уменьшением густоты овражной сети; для территорий с высокой густотой эрозионной сети характерно слабое развитие верхнего звена и преобладание водотоков нижнего звена в структуре речной сети; бассейны с небольшими значениями густоты овраж-

ной сети в большинстве случаев значительно расчленены в верхнем и среднем звене речной сети. Установление закономерности распределения эрозионных форм позволило оценить устойчивость территории к эрозионным процессам, а также прогнозировать и анализировать необходимость противоэрозионных мероприятий.

Ключевые слова: овраг; балки; сельскохозяйственные угодья; геоинформационные системы; данные дистанционного зондирования.

Для цитирования. Павлюк Я.В., Саблина О.М., Смирнова С.Б., Гладкая К.А. Анализ закономерностей развития линейной эрозии в бассейнах рек на Юге Среднерусской возвышенности с использованием ГИС // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2022. Т. 14, №3. С. 192-212. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-3-192-212

REGULARITIES ANALYSIS OF THE LINEAR EROSION DEVELOPMENT IN RIVER BASINS IN THE SOUTH OF THE CENTRAL RUSSIAN HILL WITH THE USE OF GIS

*Y.V. Pavlyuk, O.M. Sablina,
S.B. Smirnova, K.A. Gladkaya*

Significant areas of the country's territories are suffering erosion processes due to the increased anthropogenic load. Belgorod region territories are included. This fact makes the reason to the present study for the spatial and temporal patterns analysis of the linear erosion development. The analysis is needed to assess the potential territory resistance to the erosion processes within the framework of the basin concept in the South of the Central Russian Upland. The spatial distribution analysis of erosional forms in the study area makes it possible to identify patterns of distribution and assess the possible development of erosion processes. Geoinformation modeling is used to maintain the study in conjunction with natural methods for studying the linear development of the erosion network.

During the research, the methods of thematic processing of space images, geospatial analysis, GIS modeling, comparative geographic, the method of analogies, landscape planning, as well as methods of statistical and mathematical data processing were used.

The study has revealed the fact, that territories with a high erosion density and a low share of the river density is characterized with the high ravine network density with a low density of ravines. Though, territories with low erosion density

and a more developed river network are characterized by a decrease in the ravine network density; territories with a high erosion density are characterized with a weak development of upper link and the predominance of lower link of watercourses in the river network structure. Then, most basins with low ravine network density are significantly dissected in the upper and middle links of the river network. Establishing the regularity of the erosion forms distribution made it possible to assess the territory resistance of the erosion processes, as well as predict and analyze the need for anti-erosion measures.

Keywords: ravine; gully; beams; agricultural land; geoinformation systems; remote sensing

For citation. Pavlyuk Y.V., Sablina O.M., Smirnova S.B., Gladkaya K.A. Regularities Analysis of the Linear Erosion Development in River Basins in the South of the Central Russian Hill with the Use of GIS. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 192-212. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-3-192-212

Обоснование

Горизонтальное расчленение ландшафта находится в тесной взаимосвязи с наличием и деятельностью активных форм эрозии. Водные потоки на поверхности водосборов формируют струйчатую систему, которая испытывает сложные пространственные изменения, преобразуясь и эволюционируя в сложную иерархическую соподчиненную (каскадную) систему «транспортных» сетей – водно-эрозионная сеть речных бассейнов. Изучение структурных особенностей этой сети, подобия и отличий систем организации водотоков в разных природных условиях, закономерностей изменения их гидрографических характеристик – важная научная проблема геоморфологии и гидрологии, теории функционирования эрозионно-аккумулятивных систем.

Отечественные ученые Е.Ф. Зорина, И.И. Рысин, А.А. Светличный, представляют фундаментальные понятия и основы развития эрозионных процессов в различных регионах страны [3, 4, 7]. Определение ключевых показателей развития эрозионных элементов – это основы, на которых базируются исследования современных ученых. Российскими учеными обозначена важность фундаментальных проблем в геоморфологии, работе эрозионно-аккумулятивных систем, это напрямую связано с значительными сложностями крупномасштабного картирования эрозионных процессов, а также с трудностями поиска материалов для идентификации малых эрозионных форм. По картографическим материалам и данным ДДЗ вы-

деляются овраги, ложбины и крупные промоины вследствие их значительных размеров, в то время как определение небольших эрозионных форм-промоин, возможно лишь при аэро съемке, съемке с использованием БПЛА, натурных наблюдениях.

Проблемой развития деградации почв, связанной с эрозионными процессами повсеместно озабочены ученые многих стран, что подтверждают значительное количество исследований на эту тему [17].

Исследования направлены на всестороннее изучение эрозионных процессов, от составления и разработок методов моделирования эрозионных процессов, до исследования изменения состава почвенных фракций на эродированных элементах рельефа и влияния деградации почв на экономику региона.

В настоящее время значительное число ученых исследуют возможности изучения эрозионных процессов с использованием машинного обучения, что достаточно целесообразно, поскольку данная методика позволяет охватить значительные территории. Мхдис Амири, Хамид Реза Пургасеми и др. опубликовали исследования эрозионной сети, где используют различные модели машинного обучения: трех алгоритмов (RF, SVM и BRT), многомерных аддитивных регрессионных сплайнов (MARS), гибкого дискриминантного анализа (FDA), случайного леса (RF) и машины опорных векторов (SVM); и др. огромный спектр ДДЗ для построения карт прогнозирования эрозии оврагов с целью предотвращения развития эрозионных процессов. Исходными данными для проведения такого рода исследований служат ключевые факторы развития овражной сети (уклон, высота, тип землепользование, длина склона (LS), топографический индекс влажности, плотность дренажа, тип почвы, расстояние от реки) [16, 19, 21].

Развитие вышеперечисленных исследований позволит проводить анализ развития эрозионной сети на значительных территориях, что до настоящего времени было достаточно затруднительно, в связи с огромным объемом разного вида данных об эрозионной сети (картоматериалы, таблицы, отчеты и др.) которые необходимо было привести к единой форме, и проанализировать [15]. Это и послужило причиной того исследований и проектов связанных с деградацией земель изучении ов Региональные исследования остаются актуальными, поскольку верификация полученных теоретических исследований остается возможной лишь с применением полевых методик исследований, это подчеркивают как зарубежные так и отечественные ученые [1, 5, 20].

Как показывают исследования ученых J.Poesen и С.Valentin в большинстве случаев овражные процессы вызваны нарушением землепользования на территориях подверженных эрозионным процессам, по их мнению рациональное природопользование может оказать большее влияние на эрозию почву нежели изменение климатических показателей планеты [18]. В то же время, Амор Франкл путем применения современных научных методик предотвращения развития эрозионного процесса, в частности оврагообразования прогнозирует полное восстановление растительности и пахотных земель, на разрушенных ареалах [22].

Российскими учеными были разработаны методы исследования регрессивного роста оврагов: достоинства и недостатки был разработан сравнительный анализ достоинств и недостатков натуральных методик исследований темпов и механизма регрессивного роста вершин оврагов. За весь период изучения овражной сети был накоплен большой объем знаний и фактического материала о проявлениях, динамике, прогнозировании и методах предотвращения и борьбы с линейной эрозией как отечественными исследователями, так и зарубежными [12]. Изучены натурные методики исследования эрозионной сети в разных регионах в совокупности с анализом ДДЗ [2].

Натурные исследования направлены не только на изучение и анализ линейного прироста эрозионных форм, но и на выявление закономерности между площадными параметрами увеличения овражной формы и линейным приростом [13]. Однако, если до настоящего времени развитие эрозионных процессов передавали сериями разновременных карт, в нашем исследовании предлагается более универсальный способ отображения эрозионной ситуации – карты устойчивости речных бассейнов к проявлению эрозионных процессов. Создание этих материалов базируется на новых подходах к отображению активных форм рельефа и новые принципы, основанные на изучении динамики состояния эрозионных процессов внутри бассейна и во времени. Речной бассейн представляет собой сложную динамическую систему, которая характеризуется различными степенями устойчивости. В зависимости от типа и интенсивности как естественных, так и антропогенных факторов воздействия одна и та же территория может быть более устойчивой, менее устойчивой и неустойчивой к проявлению эрозии.

На основе сопоставления разновременных картофоматериалов исследователи оценивают динамичность развития эрозионных форм (скорость роста отдельных ложбин рельефа Среднерусской возвышенности может составлять 2,6 м/год [6]).

Цель исследования заключается в анализе пространственно-временных закономерностей развития линейной эрозии для оценки потенциальной устойчивости территории к ее проявлению в рамках бассейновой концепции на территории Юга Среднерусской возвышенности используя геоинформационное моделирование в совокупности с натурными методами исследования линейного развития эрозионной сети.

Задачи исследования:

1. Установить особенности пространственного распределения форм линейной эрозии в бассейнах рек лесостепи Среднерусской возвышенности.
2. Определить морфометрические характеристики эрозионных форм (ложбин, оврагов, балок) и их стадии развития в ключевых бассейнах малых рек в разных природно-антропогенных условиях.
3. Оценить динамику изменения линейных форм эрозии в бассейнах рек Белгородской области с конца XVIII в. до настоящего времени по разновременным картографическим источникам, ДДЗ и стационарным наблюдениям.
4. Проанализировать картину ближайших изменений в эрозионной ситуации территории и оценить необходимость пространственно-привязанных противоэрозионных мероприятий.

Материалы и методы

Основным объектом исследований деградации земель является эрозионная сеть, возникшая под влиянием интенсивной хозяйственной деятельности в ходе динамически развивающегося процесса линейной эрозии с относительно коротким периодом активной жизни, составляющим первые сотни лет. Спектр методов изучения линейной эрозии достаточно разнообразен, и включает в себя полевые экспедиции, сравнительный картографический анализ по разновременным картографическим материалам, ГИС, статистический анализ, использование данных дистанционного зондирования. Одним из наиболее популярных методов для картографирования линейной эрозии и динамики развития эрозионных форм является визуальный пространственно-геостатистический анализ на основе полученных данных дистанционного зондирования Земли, включая данные аэрофотосъемки и разновременных картографических материалов.

Установление активности проявления роста овражных форм на разных стадиях развития – задача, решение которой связано с совокупностью методов исследований включающих анализ данных, полученных при поле-

вых исследованиях, данных дистанционного зондирования, позволяющих составить общую расчетную схему или модель процесса с использованием ГИС. Данные о пространственном расположении и линейном приросте вершинных частей оврагов являются основным источником сведений о росте оврагов. Метод реперных точек позволяет провести линейные измерения прироста овражной сети с наименьшими трудовыми и финансовыми затратами [12].

Используя БПЛА появилась возможность создавать высокоточные ЦМР, при этом, при организации высокоточной привязки проведение повторных наблюдений позволяет проводить оценку изменений, произошедших на объекте исследования [2]. Значительное препятствие при изучении линейного прироста эрозионных форм при использовании картографических материалов является отсутствие единой масштабной основы. Для привлечения картографических данных конца XIX в. (М 1: 420 000), которые значительно отличаются по масштабу от других используемых источников (М 1: 84 000; М 1: 100 00), нами была использована фрактальная размерность густоты эрозионной сети [8].

Нами рассчитана густота овражно-балочной сети в пределах водосборов IV порядка за последние 200 лет. Она определялась без учёта протяжённости постоянных водотоков. На основе процедур геомоделирования оцифрованные данные линейной эрозионной сети по картографическим источникам конца XVIII в. и конца XX в. были преобразованы в значения густоты овражно-балочной сети в бассейнах IV порядка на территорию области. Путём вычитания растров густоты овражно-балочной и речной сети на современном этапе и прошлых столетий в ArcGIS получена карта прироста эрозионной сети. Для количественной характеристики степени трансформации овражно-балочной сети полученные приведены к единому масштабу на основе коэффициентов фрактальности [9].

Исследование геопространственного распределения линейных эрозионных форм проводилось при использовании программного обеспечения ArcGIS 10.5, который позволил автоматизировать процедуры построения и анализа серии карт.

Анализ структуры эрозионной сети был проведен на основе материалов топографических карт М 1:200000. В результате оцифровки карты были получены данные о 3745 горизонталях, которые впоследствии были преобразованы 571015 точки. Полученные данные были классифицированы по типу эрозионных форм (реки, балочно-суходольные формы) и представлены в табл.1.

Для расчета процента, который занимают овраги, балочно-суходольная сеть и реки в каждом из контуров суммарной густоты был определен процент, который занимают вышеперечисленные линейные эрозионные формы. На основании этих расчетов были построены картосхемы структуры эрозионной сети, а конкретно оценена густота эрозионной сети, учитывая овражно-балочную сеть.

Результаты

Анализируя построенные картосхемы эрозионной сети было определено общее количество эрозионных форм, которое составило 7493, при общей расчлененности территории от 0,2 до 1,9-2,0 км/км² [11]. По данным SRTM установлено, что общее количество эрозионных форм составляет 16034 при длине 22728 км (табл. 1), а густота колеблется в пределах от 0,2 до 1,2 км/км² при средних значениях 0,79 км/км² [10].

Таблица 1.

Структура овражно-балочной сети Белгородской области

Порядок эрозионных форм	Количество, шт.	Доля от общего числа, %	Длина, км	Доля от общей длины, %
I	12429	76,08	11706,7	51,96
II	2983	18,26	4920,6	21,84
III	727	4,45	3039,7	13,49
IV	150	0,92	1606,8	7,13
V	36	0,22	789,6	3,50
VI	10	0,06	415,1	1,84
VII	2	0,01	50,9	0,23
Итого	16337	100,0	22529,4	100,00

Оценка овражных форм была проведена путем оцифровки топографических карт М 1:10 000, было выделено 69827 овражные формы, которые имеют явное сосредоточение в центральной и западной части территории исследования, и именно на этих территориях отмечены максимальные линейные показатели овражных форм, в то время как восточная часть отмечена минимальным количеством овражных форм, а также минимальными показателями их протяженности.

Проведение полевых исследований, морфометрических характеристик объектов эрозионных форм позволило провести всесторонний анализ состояния овражных эрозионных форм на территории области, а также подтвердить исследования полученные картографическим, статистическим и др. теоретическими методами.

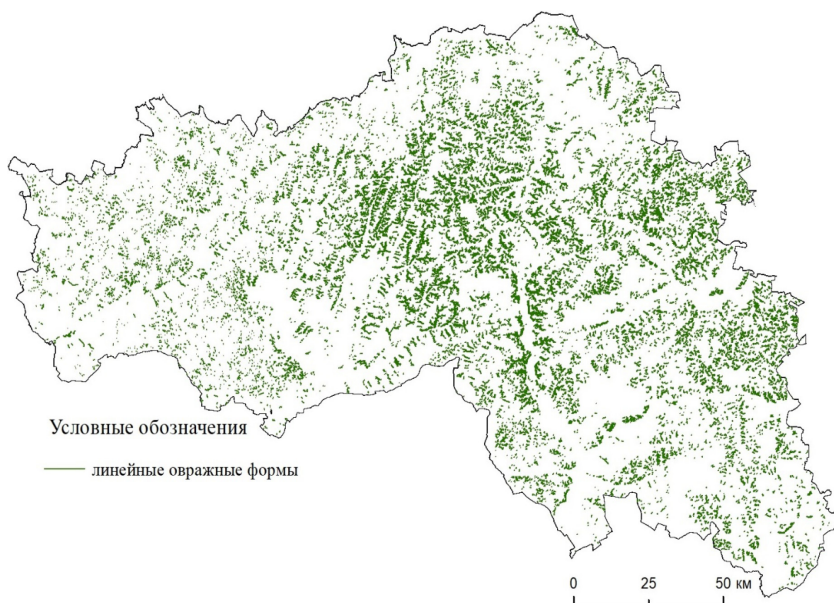


Рис. 1. Овражные формы на территории Белгородской области

Проведение полевого исследования методом реперных точек подтвердило данные о линейном приросте овражных форм на ключевом участке исследования, где было выбрано 30 ключевых овражных форм, где был измерен их линейный прирост за 3 года. Из общего числа оврагов 63 % относятся к развивающейся стадии оврага, 30% в начальной стадии развития оврага – промоина, переходящая в овраг, которая уже имеет вершинный обрыв, 7% имеют затухающую стадию.

Было выявлено, что линейный прирост колеблется от 0 до 4,25 м за период исследования (то есть за 3 года), средний прирост составляет 0,25 м. в год, при этом на отдельных объектах он достигает значений до 1,5 метра. Низкие показатели прироста отмечены на оврагах, находящихся в затухающей стадии развития, частично на объектах в развивающейся стадии, что объясняется введением противоэрозионных мероприятий (земляные валы). Высокие показатели прироста отмечены на овражных формах, которые относят к склоновым овражным формам, верховье оврага расположено на территории сельскохозяйственных угодий, то есть вблизи ведётся активное землепользование.

Таблица 2.

Изменение овражно-балочной сети Белгородской области с конца XVIII в.

Бассейн	XVIII в.		XX в.		Разница		Прирост, %
	длина, км	густота, км/км ²	длина, км	густота, км/км ²	длина, км/км ²	густота, км/км ²	
Айдар	886,15	0,61	1028,92	0,71	142,77	0,1	16,11
Валуи	721,63	0,54	875,89	0,65	154,26	0,11	21,38
Ворскла	1459,47	0,59	1667,07	0,67	207,6	0,08	14,22
Нежеголь	1394,5	0,49	1614,16	0,57	219,66	0,08	15,75
Оскол	4156,41	0,6	4833,76	0,7	677,35	0,1	16,3
Потудань	494,17	0,48	614,95	0,6	120,78	0,12	24,44
Псел	1081,92	0,47	1247,19	0,54	165,27	0,07	15,28
Северский Донец	2034,24	0,55	2463,58	0,67	429,34	0,12	21,11
Сейм	248,14	0,3	328,2	0,4	80,06	0,1	32,26
Тихая Сосна	1665,99	0,56	1968,38	0,66	302,39	0,1	18,15
Черная Калитва	753,36	0,61	998,63	0,8	245,27	0,2	32,56
Всего	14895,98	0,55	17640,73	0,65	2744,75	0,10	18,43

Установлено, что в конце XVIII в. длина эрозионной сети области составляла 15242 км, однако, к концу XX в. она увеличилась до 18064 км. Скорость прироста составила почти 13 км/год. Произшедшие изменения внутри бассейнов отражены в таблице 2.

Анализ карты густоты карт эрозионного расчленения карты показал, что выделяются зоны с повышенной густотой эрозионной сети (в пределах 0,9-1,5 км/км²) вдоль долин ряда крупных и малых рек области – Оскол, Северский Донец, Валуи, Тихая Сосна, Псел. Некоторый градиент к уменьшению показателя можно выявить на юго-востоке области.

Таблица 3.

Суммарная густота эрозионного расчленения территории реками, балками, суходолами и оврагами на территории Белгородской области

№ п/п	Густота эрозионной сети, км/км ²	Количество бассейнов IV порядка	Площадь, км ²	Площадь, %
1	менее 0,20	5	250,3	0,93
2	0,20-0,40	2	392,4	1,45
3	0,41-0,60	9	796,8	2,95
4	0,61-0,90	94	12879,3	47,70
5	0,91-1,50	104	12668,7	46,92
6	1,51-2,50	1	12,5	0,05

К настоящему времени густота овражно-балочной составляет $0,70 \text{ км/км}^2$. Наиболее сильное эрозионное расчленение отмечено в бассейнах Черной Калитвы ($0,80 \text{ км/км}^2$), Айдара ($0,71 \text{ км/км}^2$), Оскола ($0,70 \text{ км/км}^2$). Этот район характеризуется также максимально интенсивным оврагообразованием [14]. Наименьшие значения наблюдаются в бассейнах рек Сейм ($0,4 \text{ км/км}^2$), Псёл ($0,5 \text{ км/км}^2$) и Нежеголь ($0,6 \text{ км/км}^2$).

Для комплексной оценки распространения овражно-балочной сети были построены картосхемы густоты овражной сети, суммарной густоты эрозионного расчленения территории реками, балками, суходолами и оврагами на территории Белгородской области, процентного соотношения оврагов в общей доле эрозионного расчленения территории Белгородской области, процентного соотношения балочно-суходольной сети в общей доле эрозионного расчленения территории Белгородской области.

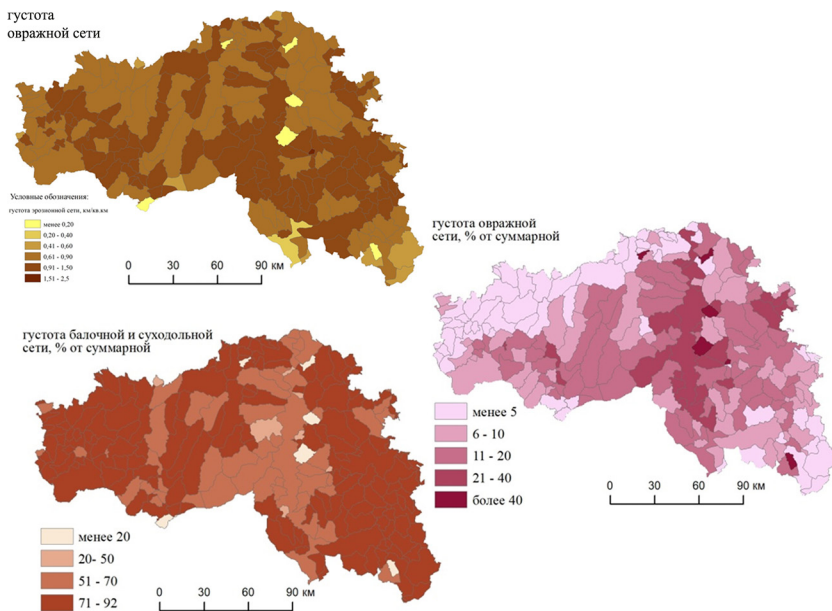


Рис. 2. Картосхемы густоты эрозионных форм на территории Белгородской области.

По полученным количественным данным можно отметить, что 85 % области занято территорией с невысоким процентом (до 20%), активных эрозионных форм, то есть оврагов. Анализ карты густоты овражной сети

% от суммарной показал, что бассейны с высоким коэффициентом развития овражной сети (более 20 % оврагов от суммарной густоты долинной сети) приурочены к центральной части области и уменьшается к ее периферии, особенно высокие показатели характерны для долины р. Оскол.

Таким образом, в современной структуре эрозионного расчленения Белгородской области активные, растущие эрозионные формы (овраги, рытвины) более характерны для бассейна р. Оскол, имеющей субмеридианальное расположение, а стабильные эрозионные формы приурочены в большей степени к бассейнам остальных рек.

Карта процентного соотношения балочно-суходольной сети в общей доле эрозионного расчленения территории Белгородской области отражает, то, что западная и восточная периферия области имеет более высокую долю эрозионных форм, относящихся к стагнирующим, и стабильным, обычно полностью задернованным – балки и логи. Это свидетельствует о затухании активности эрозионных процессов на данных территориях.

Территории, обладающие высокими показателями густоты овражной сети и высокими показателями балочно-суходольной сети, при низкой плотности овражной сети свидетельствуют об окончании процесса выработки эрозионных форм в виде оврагов на конечных стадиях развития. Территории с низкой густотой и высокой плотностью свидетельствуют о интенсивном развитии эрозионных процессов на территории, и отражают необходимость проведения противоэрозионных мероприятий. Так же следует напомнить и об исторических предпосылках формирования такой ситуации, так сложилось, что наибольшую антропогенную нагрузку испытывали территории в восточной и западной части области, о чем свидетельствуют карты распаханности территории, в то время как в центральной части мы наблюдаем средние значения распаханности территории.

Заключение

Для оценки развития линейных форм эрозии на территории исследования были построены карты распространения оврагов, балочной сети, суходольной сети, речной сети, установлены ключевые взаимосвязи распределения их по территории исследования. Были проведены натурные исследования с использованием метода реперных точек, исследования с использованием БПЛА, использованы высокоточные космические снимки.

Анализируя построенные картосхемы, необходимо отметить, что территории со значительными показателями густоты эрозионной сети и не-

высокими долями густоты речной сети обладают высокими показателями густоты овражной сети при невысокой плотности оврагов. В западной части области мы наблюдаем большое количество небольших и средних эрозионных форм, в то время как в восточной части области преобладают крупные донные и склоновые овраги. Количество этих эрозионных форм рельефа незначительно, но их длины составляют свыше 1000 м (при среднем значении длин тальвегов оврагов – 600 м). Таким образом, в восточной и центральной части области (включая бассейн р. Оскол) овражные формы находятся в пределе своего развития, что говорит о окончательной выработке потенциала эрозионных форм. В то время как эрозионные формы в западной части области наоборот, находятся на стадии активного развития. Развитие эрозионной сети напрямую связано с развитием речной сети, анализ изменения протяженности речной сети за двухсотлетний период и распределения современной густоты речной сети подтверждают полученные выводы.

Территории с невысокими значениями густоты эрозионной сети и более развитой речной сетью характеризуются уменьшением густоты овражной сети. Однако, плотность овражной сети возрастает. На данных территориях наблюдается большое количество малых овражных форм, что свидетельствует об активизации эрозионных процессов к настоящему моменту. Овраги находятся в стадии активного роста. Площадь зоны “непроявляющейся” эрозии здесь достигает 80%. При отсутствии необходимого комплекса противозэрозионных мероприятий это может привести к ухудшению эрозионной ситуации.

Анализ общей структуры эрозионной сети показал, что для территорий с высокой густотой эрозионной сети характерно слабое развитие верхнего звена и преобладание водотоков нижнего звена в структуре речной сети.

Бассейны с небольшими значениями густоты овражной сети в большинстве случаев значительно расчленены в верхнем и среднем звене речной сети.

В ходе исследования было установлено, что развитие линейных форм эрозии на территории исследования происходит достаточно стремительно и неоднородно.

Анализ структуры эрозионной сети позволил выявить следующие закономерности:

- 1) территории с высокой густотой эрозионной сети и низкой долей густоты речной сети имеют высокие значения густоты овражной сети при невысокой плотности оврагов; это свидетельствует о том, что на указан-

ных территориях овраги находятся в своей завершающей стадии развития и обладают максимальными показателями протяженности. Низкая доля речной сети объясняется минимальном влиянии на нее эрозионных процессов, поскольку не возникает изменений количества наносов, что препятствует формированию новых элементов речной сети.

2) территории с невысокими значениями густоты эрозионной сети и более развитой речной сетью характеризуются уменьшением густоты овражной сети. Однако, плотность овражной сети возрастает. На данных территориях наблюдается большое количество малых овражных форм, что свидетельствует об активизации эрозионных процессов к настоящему моменту, что объясняется высокой антропогенной нагрузкой на вышеуказанные территории, и окончанием процесса выработки балочно-суходольной сети.

3) для территорий с высокой густотой эрозионной сети характерно слабое развитие верхнего звена и преобладание водотоков нижнего звена в структуре речной сети; что можно объяснить скоплением наносов в верхнем звене речной сети, что оказывает отрицательное влияние на нижние звенья.

4) бассейны с небольшими значениями густоты овражной сети в большинстве случаев значительно расчленены в верхнем и среднем звене речной сети.

Характеристики прироста линейных показателей овражных форм на ключевом участке исследования отражают в пониженные темпы прироста овражной сети, среди которых максимальным показателям соответствуют формы, расположенные на участках с активной антропогенной деятельностью и формам, находящимся в стадии активного роста; в то время как минимальные показатели отмечены на затухающих овражных формах. Антропогенная деятельность должна быть направлена на сохранение и приумножение природных ресурсов, а также на сокращение интенсивности развития эрозионной сети, что, в свою очередь, уменьшит сокращение площади пахотных земель. Активная фаза развития эрозионных форм на территории центральной части области подтверждает необходимость первоочередного проведения радикальных противоэрозионных мероприятий на склонах, вблизи эрозионных форм, а также изменения вида землепользования вблизи развивающихся эрозионных форм. В то время как восточная часть территории нуждается в противоэрозионных мероприятиях, основанных на корректировке режима землепользования.

Список литературы

1. Белоусова Л.И. Региональные особенности развития и распространения экзогенных геоморфологических процессов на территории Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Естественные науки. 2011. № 3(98), вып. 14. С. 162-169.
2. Гафуров А.М. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Естественные науки. 2019. Т. 43. № 2. С. 182-190. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-2-182-190>
3. Григорьев И.И., Рысин И.И. Оценка линейного и площадного прироста оврагов с применением инструментальных методов (на территории Удмуртии) // Геоморфология. - Москва: Институт географии РАН, 2021. №3. С.64-74.
4. Зорина Е.Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития / Е.Ф. Зорина, Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Москва: ГЕОС, 2003. 168 с.
5. Корнилов А.Г. Сравнительная характеристика воздействия горнодобывающих предприятий КМА на экологическую ситуацию рек Белгородской области / А. Г. Корнилов, С. Н. Колмыков, Е. В. Кичигин, Л.Ю. Гордеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: ГИАБ, 2010. № 6. С. 134-139.
6. Кузьменко Я.В. Нарожняя А.Г. Функционирование бассейновых ландшафтных структур в условиях высокочастотной изменчивости стокоформирующих факторов // Общие и методические проблемы эрозии– и русловедения: сб. статей. М: Планета, 2012. С. 157-165.
7. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения // НИУ БелГУ [под ред. А.А. Светличного]. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
8. Нарожняя А.Г., Павлюк Я.В., Голиков М.А. Определение фрактальной размерности эрозионной сети Белгородской области // Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование : сб. тр. материалов междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию кафедры почвоведения БГУ и 80-летию со дня рождения В.С. Аношко (Минск, 20-23 сент. 2018 г.). Минск, 2018. С. 127–131.
9. Нарожняя А.Г., Кузьменко А.Г. Речные бассейны Белгородской области и их типизация по эколого-ландшафтным условиям с использованием ГИС-технологий // Эколого-географические исследования в речных бассейнах: материалы третьей Международной научно-практической конференции (Воронеж, 15–17 окт. 2009 г.). Воронеж: ВГПУ, 2009. С. 88-92.

10. Павлюк Я.В. Развитие эрозионной сети в бассейнах рек Белгородской области за последние 200 лет // Тридцать третье пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (Нижевартовск, 02-04 октября 2018 г.). Нижевартовск: Издательство НВГУ, 2018. С. 141-144.
11. Петина В.И., Гайворонская Н.И, Белоусова Л.И. Эрозионные процессы на территории Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Естественные науки. 2009. № 11(66), вып. 9/2. С. 109-117.
12. Сатдаров А.З. Методы исследования регрессивного роста оврагов: достоинства и недостатки // Ученые записки Казанского университета. Сер.: Естественные науки. 2016. Т. 158, кн. 2. С. 277-292.
13. Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К., Еременко Е.А. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (ст. 3. анализ структуры сети водотоков) // Геоморфология. М. № 1. Наука, 2018. С. 18-32. <https://doi.org/10.7868/S0435428118010029>
14. Хрисанов В.А., Колмыков С.Н. Современное оврагообразование как мощный фактор уничтожения плодородных земель Белгородской области // Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки. 2015. №21(218), вып. 33. С. 106-113.
15. Arabameri, K. Rezaei, H.R. Pourghasemi, S. Lee, M. Yamani. GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique // Environmental Earth Sciences. 2018. Vol. 77 (17), 628 p.
16. Amiya Gayen, Hamid Reza Pourghasemi, Sunil Saha, Saskia Keesstra, Shibiao Bai. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 668, pp. 124-138
17. C.Valentina, J.Poesenb, Yong Lic. Gully erosion: Impacts, factors and control // CATENA. 2005. Vol. 63 (2-3), pp. 132-153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
18. J. Poesen, J. Nachtergaele, G. Verstraeten, C. Valentin. Gully erosion and environmental change: importance and research needs // CATENA. 2003. Vol. 50(2-4), pp. 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
19. Mahdis Amiri, Hamid Reza Pourghasemi, Gholam Abbas Ghanbarian, Sayed Fakhreddin Afzali. Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms // Geoderma. 2019. Vol. 340, pp. 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.042>

20. Matthias Vanmaercke. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art/ Matthias Vanmaercke, Panos Panagosc, Tom Vanwalleghem, Antonio Hayas, Saskia Foerster, Pasquale Borrelli [et al.] // *Earth-Science Reviews*. 2021. Vol. 218, Article 103637. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>
21. Hamid Reza Pourghasemi, Nitheshnirmal Sadhasivam, Narges, Adrian L. Collins. Gully erosion spatial modelling: Role of machine learning algorithms in selection of the best controlling factors and modelling process // *Geoscience Frontiers*. 2020. Vol. 218(6), pp. 2207-2219. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.005>
22. Amaury Frankl, Jan Nyssen, Matthias Vanmaercke, Jean Poesen. Gully prevention and control: Techniques, failures and effectiveness // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021. Vol. 46(1), pp. 220-238. <https://doi.org/10.1002/esp.5033>

References

1. Belousova L.I. Regional'nye osobennosti razvitiya i rasprostraneniya ekzogennykh geomorfologicheskikh protsessov na territorii Belgorodskoy oblasti [Regional Features of the Development and Distribution of Exogenous Geomorphological Processes on the Territory of the Belgorod Region]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki* [Scientific statements of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences], Belgorod, 2011, no. 3(98), issue 14, pp. 162-169.
2. Gafurov A.M. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya otsenki pochvennoy erozii [Use of unmanned aerial vehicles to assess soil erosion]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki* [Scientific statements of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences], Belgorod, 2019, vol. 43, no. 2, pp. 182-190. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-2-182-190>
3. Grigor'ev I.I., Rysin I.I. Otsenka lineynogo i ploshchadnogo prirosta ovragov s primeneniem instrumental'nykh metodov (na territorii Udmurtii) [Assessment of linear and areal growth of ravines using instrumental methods (on the territory of Udmurtia)]. *Geomorfologia* [Geomorphology], Moscow: Institut geografii RAN Publ., 2021, vol. 3, pp. 64-74.
4. Hrisanov V.A., Kolmykov S.N. Sovremennoe ovragoobrazovanie kak moshhnyj faktor unichtozheniya plodorodnyh zemel' Belgorodskoj oblasti [Modern gully formation as a powerful factor in the destruction of fertile lands in the Belgorod region]. *Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Estestvennye nauki* [Scientific statements of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences], Belgorod, 2015, no. 21(218), issue 33, pp. 106-113.

5. Kornilov A.G. Sravnitel'naja harakteristika vozdejstvija gornodobyvajushhih predpriyatij KMA na jekologicheskiju situaciju rek Belgorodskoj oblasti [Comparative characteristics of the impact of mining enterprises of the KMA on the ecological situation of the rivers of the Belgorod region]. A. G. Kornilov, S. N. Kolmykov, E. V. Kichigin, L.Ju. Gordeev. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], Moscow: GIAB Publ., 2010, no. 6, pp. 134-139.
6. Kuz'menko Ja. V. Narozhnjaja A.G. Funkcionirovanie bassejnyh landshaftnyh struktur v uslovijah vysokochastotnoj izmenchivosti stokoformirujushhih faktorov [Functioning of basin landscape structures under conditions of high-frequency variability of runoff-forming factors]. *Obshhie i metodicheskie problemy jerozio- i ruslovedenija: sb. Statej* [General and methodological problems of erosion and channel studies: collection of articles], Moscow: Planeta Publ., 2012, pp. 157-165.
7. Lisetskij F.N., Svetlichnyy A.A., Chernyy S.G. *Sovremennye problemy eroziovedeniya: monografiya pod red. A. A. Svetlichnogo* [Modern problems of erosion studies: monograph edited by A. A. Svetlichnogo], Belgorod: Konstanta Publ., 2012, 456 p.
8. Narozhnjaja A.G., Pavljuk Ja. V., Golikov M.A. Opredelenie fraktal'noj razmernosti jerozionnoj seti Belgorodskoj oblasti [Determination of the fractal dimension of the erosion network of the Belgorod region]. *Pochvy i zemel'nye resursy: sovremennoe sostojanie, problemy racional'nogo ispol'zovanija, geoinformacionnoe kartografirovanie : sb. tr. materialov mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvjashh. 85-letiju kafedry pochvovedeniya BGU i 80-letiju so dnja rozhdenija V.S. Anoshko (Minsk, 20-23 sent. 2018 g.)* [Soils and land resources: current state, problems of rational use, geoinformation mapping: a collection of proceedings of the materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the Department of Soil Science of the Belarusian State University and the 80th anniversary of the birth of V.S. Anoshko], Minsk: 2018, pp. 127-131.
9. Narozhnjaja, A.G., Kuz'menko A.G. Rechnye bassejny Belgorodskoj oblasti i ih tipizacija po jekologo-landshaftnym uslovijam s ispol'zovaniem GIS-tehnologij [River basins of the Belgorod region and their typification according to ecological and landscape conditions using GIS technologies]. *Jekologo-geograficheskie issledovanija v rechnyh bassejnah: materialy tret'ej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Voronezh, 15-17 okt. 2009 g.)* [Ecological and geographical research in river basins: materials of rare scientific and practical conferences], Voronezh: VGPU Publ., 2009, pp. 88-92.

10. Pavljuk Ja.V. Razvitie jerozionnoj seti v bassejnah rek Belgorodskoj oblasti za poslednie 200 let [Development of the erosion network in the river basins of the Belgorod region over the past 200 years]. *Tridcat' tret'e plenarnoe mezvuzovskoe koordinacionnoe soveshhanie po probleme jerozionnyh, ruslovyh i ust'evykh processov (Nizhnevartovsk, 02-04 oktjabrja 2018 g.)* [Thirty-third plenary interuniversity coordination meeting on the problem of erosion, channel and estuarine processes], Nizhnevartovsk: NVGU Publ., 2018, pp. 141-144.
11. Petina V.I., Gajvoronskaja N.I., Belousova L.I. Jerozionnye processy na territorii Belgorodskoj oblasti [Erosion processes on the territory of the Belgorod region]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki* [Scientific statements of the Belgorod State University. Series: Natural Sciences], Belgorod, 2009, no. 11(66), rel. 9/2, pp. 109-117.
12. Satdarov A.Z. Metody issledovaniya regressivnogo rosta ovragov: dostoinstva i nedostatki [Methods for studying the regressive growth of ravines: advantages and disadvantages]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki* [Scientific notes of Kazan University. Series: Natural Sciences], 2016, vol. 158, book 2, pp. 277-292.
13. Sidorchuk A.Ju., Panin A.V., Borisova O.K., Eremenko E.A. Geomorfologicheskie podhody k ocenke velichiny rechnogo stoka v geologicheskom proshlom (st. 3. analiz struktury seti vodotokov) [Geomorphological approaches to assessing the magnitude of river flow in the geological past (article 3. analysis of the structure of the network of watercourses)]. *Geomorfologija* [Geomorphology], Moscow: Nauka Publ., 2018, no. 1, pp. 18-32.
14. Zorina, E.F. *Ovrazhnaja jerozija: zakonomernosti i potencial razvitija* [Gully Erosion: Patterns and Development Potential]. Mosk. gos. un-t im. M. V. Lomonosova, Moscow: GEOS Publ., 2003, 168 p.
15. Arabameri, K. Rezaei, H.R. Pourghasemi, S. Lee, M. Yamani. GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77 (17), 628 p.
16. Amiya Gayen, Hamid Reza Pourghasemi, Sunil Saha, Saskia Keesstra, Shibiao Bai. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 668, pp. 124-138.
17. C.Valentina, J.Poesenb, Yong Lic. Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA*, 2005, vol. 63 (2-3), pp. 132-153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
18. J. Poesen, J. Nachtergaele, G. Verstraeten, C. Valentin. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA*, 2003, vol. 50 (2-4), pp. 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)

19. Mahdis Amiri, Hamid Reza Pourghasemi, Gholam Abbas Ghanbarian, Sayed Fakhreddin Afzali. Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*, 2019, vol. 340, pp. 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.042>
20. Matthias Vanmaercke. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art/ Matthias Vanmaercke, Panos Panagos, Tom Vanwallegem, Antonio Hayas, Saskia Foerster, Pasquale Borrelli [et al.]. *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 218, Article 103637. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>
21. Hamid Reza Pourghasemi, Nitheshnirmal Sadhasivam, Narges, Adrian L. Collins. Gully erosion spatial modelling: Role of machine learning algorithms in selection of the best controlling factors and modelling process. *Geoscience Frontiers*, 2020, vol. 218(6), pp. 2207-2219. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.005>
22. Amaury Frankl, Jan Nyssen, Matthias Vanmaercke, Jean Poesen. Gully prevention and control: Techniques, failures and effectiveness. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, vol. 46(1), pp. 220-238. <https://doi.org/10.1002/esp.5033>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Павлюк Ярослава Валерьевна, доцент, кандидат географических наук
Национальный исследовательский университет «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»
ул. Победы, 85, г. Белгород, Российская Федерация
pavlyuk@bsu.edu.ru

Саблина Ольга Михайловна

Национальный исследовательский университет «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»
ул. Победы, 85, г. Белгород, Российская Федерация
sablina@bsu.edu.ru

Смирнова Станислава Борисовна

*Национальный исследовательский университет «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»
ул. Победы, 85, г. Белгород, Российская Федерация
smirnova_s@bsu.edu.ru*

Гладкая Кристина Александровна

*Национальный исследовательский университет «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»
ул. Победы, 85, г. Белгород, Российская Федерация
danilova@bsu.edu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS**Yaroslava V. Pavlyuk**

*Belgorod State National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, Russian Federation
pavlyuk@bsu.edu.ru*

Olga M. Sablina

*Belgorod State National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, Russian Federation
sablina@bsu.edu.ru*

Stanislava B. Smirnova

*Belgorod State National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, Russian Federation
smirnova_s@bsu.edu.ru*

Kristina A. Gladkaya

*Belgorod State National Research University
85, Pobedy Str., Belgorod, Russian Federation
danilova@bsu.edu.ru*

Поступила 14.03.2022

После рецензирования 24.03.2022

Принята 01.04.2022

Received 14.03.2022

Revised 24.03.2022

Accepted 01.04.2022