

СОДЕРЖАНИЕ

Том 154, номер 5–6, 2022

Геоинформационное картографирование овражной сети (на примере ландшафтов Саратовской области) <i>Р. А. Медведева, О. П. Ермолаев</i>	3
Динамика урбанизации пойменно-руслового и террасового комплексов р. Ангары в пределах г. Иркутска <i>М. Ю. Опекунова, А. Н. Воробьёв</i>	22
Скверы в городах Российской Арктики: приоритетные экосистемные функции и услуги, способствующие адаптационному развитию и устойчивости городов <i>А. В. Евсеев, Т. М. Красовская</i>	36
Оценка эстетических свойств равнинных ландшафтов дистанционными методами зондирования земли (на примере музея-заповедника “Куликово поле”) <i>Н. Н. Калущикова, Э. А. Лозбенева</i>	47
Внутренний туризм в муниципальных образованиях СЗФО: статистические оценки и влияние пандемии COVID-19 <i>И. А. Иванов, Т. В. Васильева, И. Н. Красильникова, А. Г. Манаков</i>	59
Формирование прорванных излучин и образование разветвлений на меандрирующих реках <i>Р. С. Чалов, А. А. Куракова, С. Н. Рулева</i>	73
Водная эрозия почв в бассейнах крупнейших рек Сибири <i>А. С. Цыпленков, С. Р. Чалов, Г. Л. Шинкарева</i>	86
Анализ качества глобальной цифровой модели рельефа GMTED2010 для оценки эрозионного потенциала (на примере юга европейской территории России) <i>К. А. Мальцев</i>	112

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОВРАЖНОЙ СЕТИ (НА ПРИМЕРЕ ЛАНДШАФТОВ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

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

^аКазанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: gregina8@mail.ru

**E-mail: oermol@gmail.com

Поступила в редакцию 24.10.2022 г.

После доработки 22.11.2022 г.

Принята к публикации 02.12.2022 г.

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

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

DOI: 10.31857/S086960712205007X

ВВЕДЕНИЕ

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

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

Картографирование современной овражной эрозии на основе полевых методов с использованием данных дистанционного зондирования проведены во многих регионах мира [23, 25, 29, 30, 33, 36–38]. Тем не менее, в региональном масштабе в европейской части континента картографирование оврагов проведено только лишь в ряде стран [39]. Такие исследования в разное время были сделаны в Словакии [24], Польше [29, 31], Румынии [35], Франции [26] и Венгрии [32]. Пространственное развитие современных оврагов с использованием данных дистанционного зондирования в России изучалось в большом регионе Среднего Поволжья (более 170000 км²) [3–5, 13, 28], на юге Восточной Сибири [15].

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

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Саратовская область расположена на юго-востоке Восточно-Европейской равнины в северной части Нижнего Поволжья, граничит на юге с Волгоградской областью, на западе с Воронежской и Тамбовской областями, на севере — с Пензенской, Самарской, Ульяновской областями; на востоке проходит государственная граница России с Казахстаном. Регион находится в нескольких ландшафтных зонах: степной и, частично, лесостепной и полупустынной (рис. 1), занимая территорию 100.2 тыс. км².

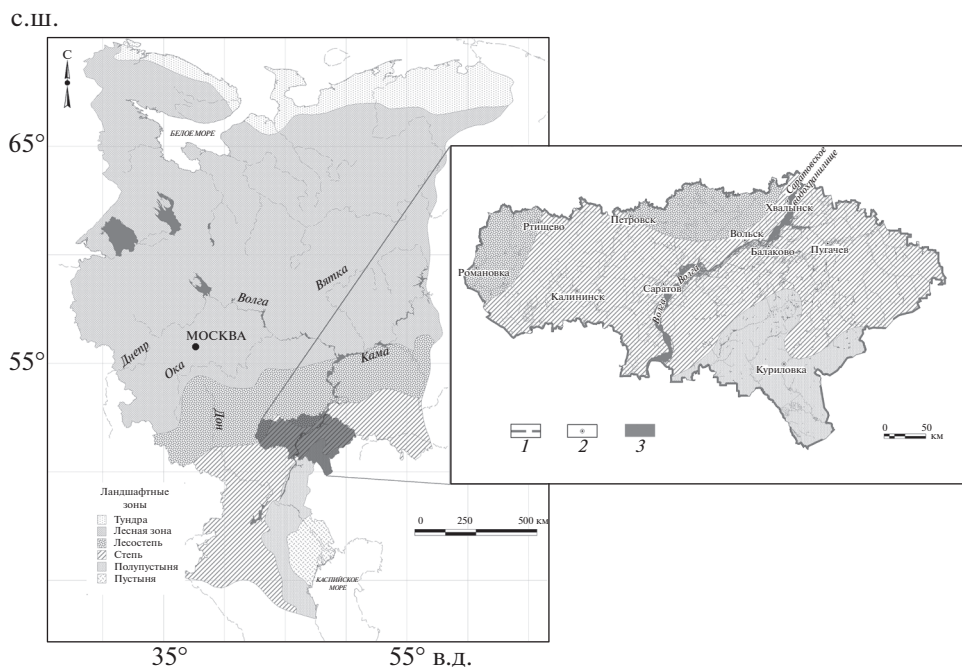


Рис. 1. Район исследования. 1 – граница Саратовской области, 2 – населенные пункты, 3 – водные объекты.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ИЗУЧЕННОСТЬ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

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

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

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

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

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

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

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

Важным этапом работ являлось формирование системы дешифровочных признаков. К ним относятся: а) плановая форма оврага, имеющая хорошо различимые границы; б) линейный и дендритообразный рисунок изображения с четко выраженной бровкой и тальвегом; в) косвенные признаки (тени, позволяющие идентифицировать поперечный профиль оврага); цвет и тон изображения – для детектирования обнаженных участков склона овражных форм. Выявлена также зависимость четкости отображения оврага на космическом снимке от цвета пород, в которых возник эрозионный врез. Надежно дешифрируются формы, имеющие тон изображения от светло-серого до почти белого за счет эрозионного врезания в карбонатно-кремнистые, известняковые, мел-мергельные горные породы. Особенностью оврагов Саратовской области было отмечено большое количество длинных и узких овражных форм в меловых отложениях, имеющих незадернованные склоны, но находящиеся в стабильном, “законсервированном” состоянии без следов активного роста (рис. 2).

Для идентификации оврагов на пограничных стадиях их развития были определены критерии, позволяющие исключить из дешифрирования собственно промоины, которые отличаются от овражной формы глубиной и шириной: менее 1.5 и 3 м соответственно. На снимках чаще используется критерий ширины линейного размыва. Такой порог в размерности, нам представляется достаточно надежным. При меньшей ширине и глубине размывов эти линейные формы относятся уже собственно к промоинам и, как правило, запахиваются сельскохозяйственной техникой при обработке. Также при глубине более 1.5 м склоновые потоки полностью дренируют все почвенные горизонты и вскрывают материнскую породу (четвертичные и коренные отложения). Балочные формы имеют плохо выраженную бровку, трапециевидный поперечный профиль, заросшие луговой и древесно-кустарничковой растительностью склоны, а устье и вершина определяется не четко [4]. Овраги были разделены по происхождению на первичные (склоновые и береговые) и вторичные (донные) овраги. К склоновым оврагам отнесены линейные формы длиной более 70–80 м и глубиной – свыше 1.5 м, имеющие хорошо выраженный водосбор и выходящие за бровку берегового уступа на склоны бассейнов. Короткие овраги, сформировавшиеся на бортах речных долин, определялись как береговые. Вторичный врез в днищах балочных форм и логов относились к донным оврагам (рис. 3).

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

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

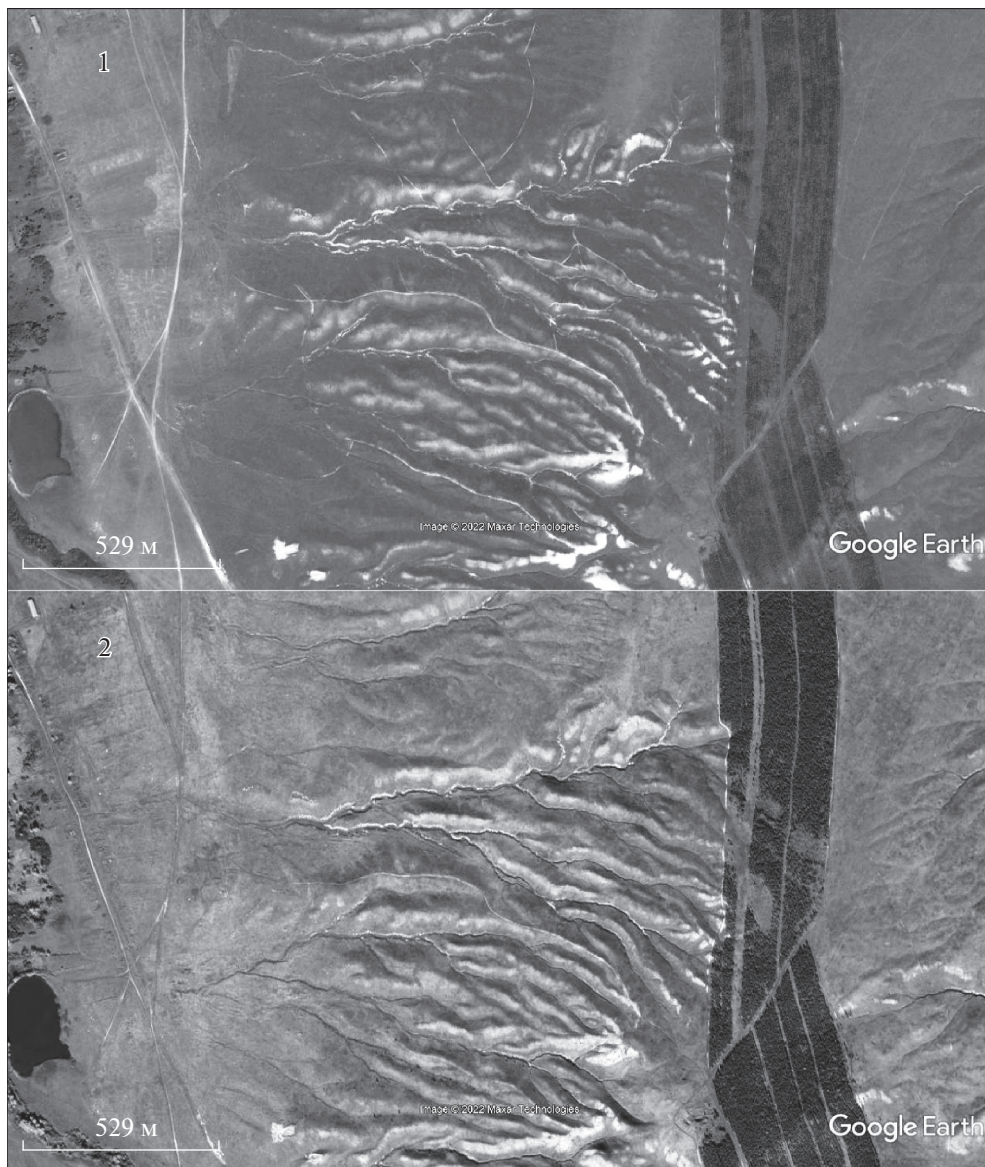


Рис. 2. Пример отображения овражной сети Саратовской области на космических снимках: 1 – 2007 г., 2 – 2018 г. (с. Труевая Маза, 52°18'45" с.ш., 47°24'49" в.д.).

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

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



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

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

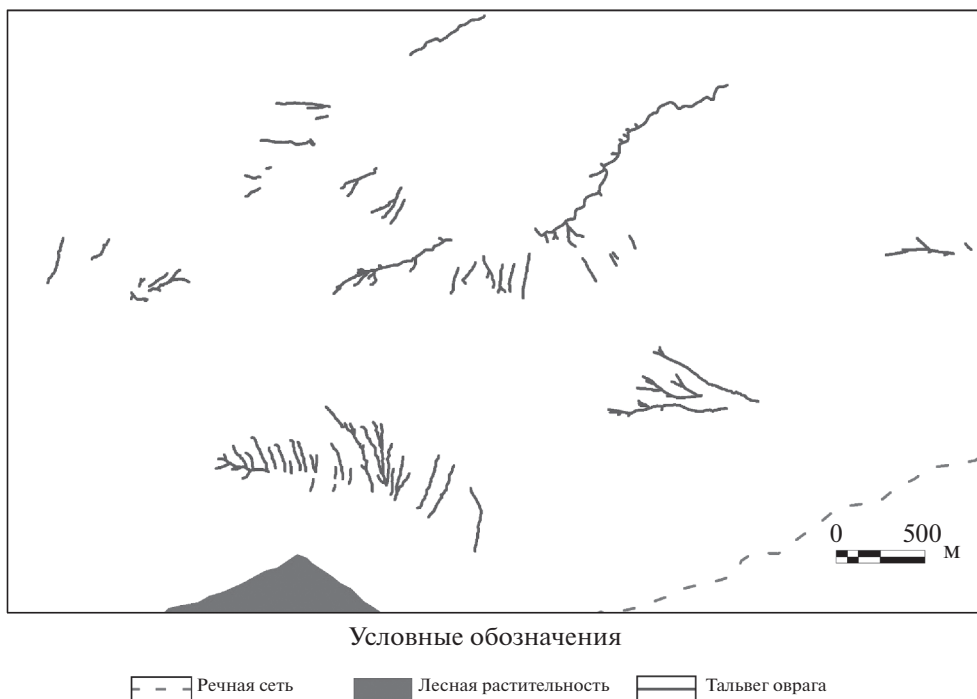


Рис. 4. Пример отображения векторного слоя тальвегов оврагов (52°10'15" с.ш., 46°41'36" в.д.).

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

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

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

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

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

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

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

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

Выбор участка обусловлен наличием:

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

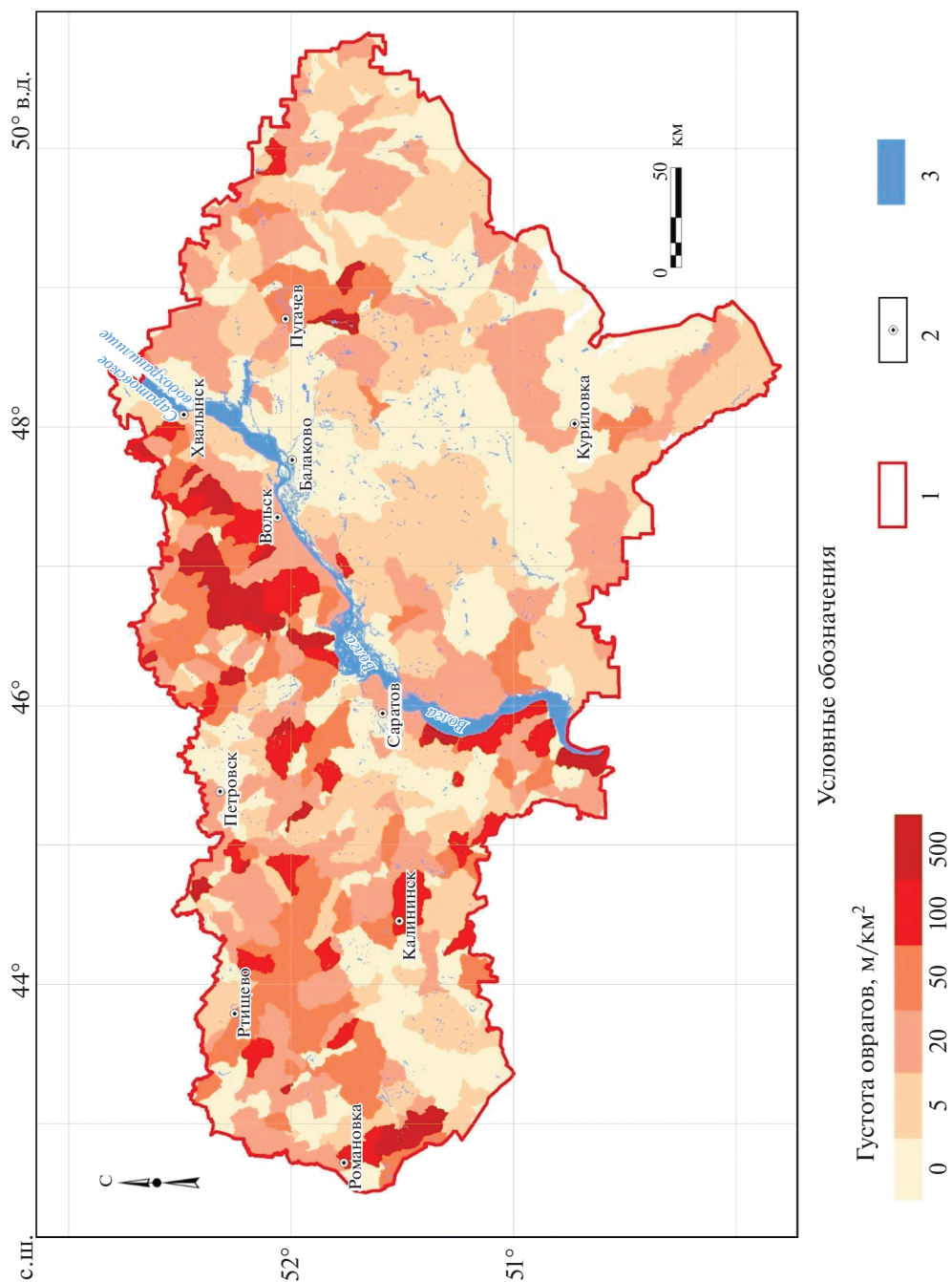


Рис. 5. Густота современной овражной сети на территории Саратовской области. 1 – граница Саратовской области, 2 – населенные пункты, 3 – водные объекты.

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

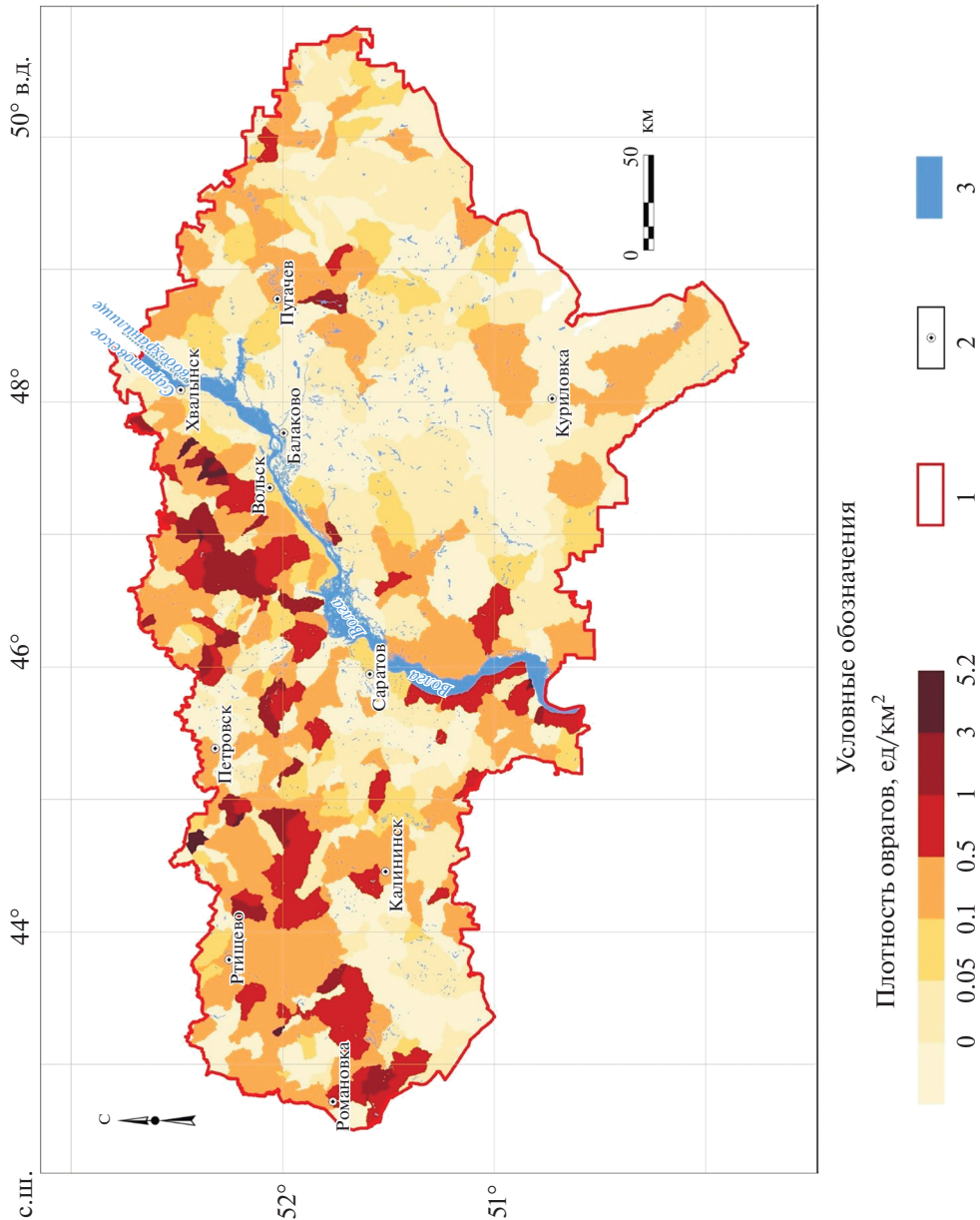


Рис. 6. Плотность современной овражной сети на территории Саратовской области. 1 — граница Саратовской области, 2 — населенные пункты, 3 — водные объекты.

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

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

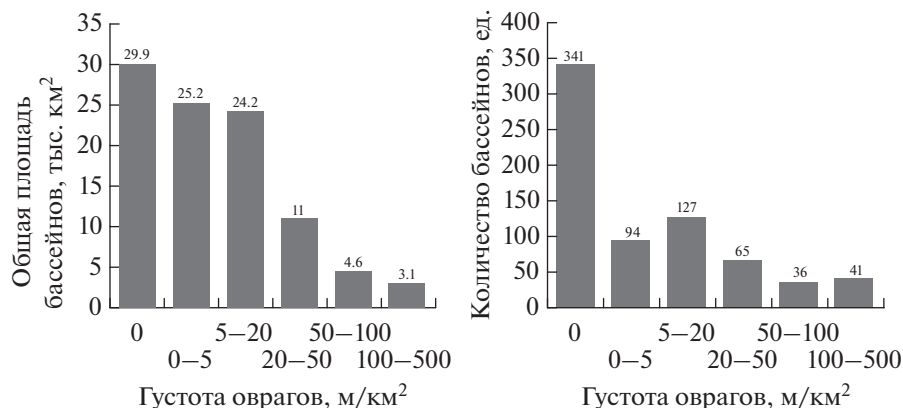


Рис. 7. Распределение густоты оврагов по количеству бассейнов и по общей площади бассейнов.

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

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

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

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

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

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

Показатели	Коэффициент корреляции
Распаханность, %	–0.3
Лесистость, %	0.2
Залуженность, %	0.2
Средняя крутизна склонов, град.	0.4
Модуль стока воды, м ³ /(сек. м ²)	0.2
Годовой слой стока воды, мм	0.3

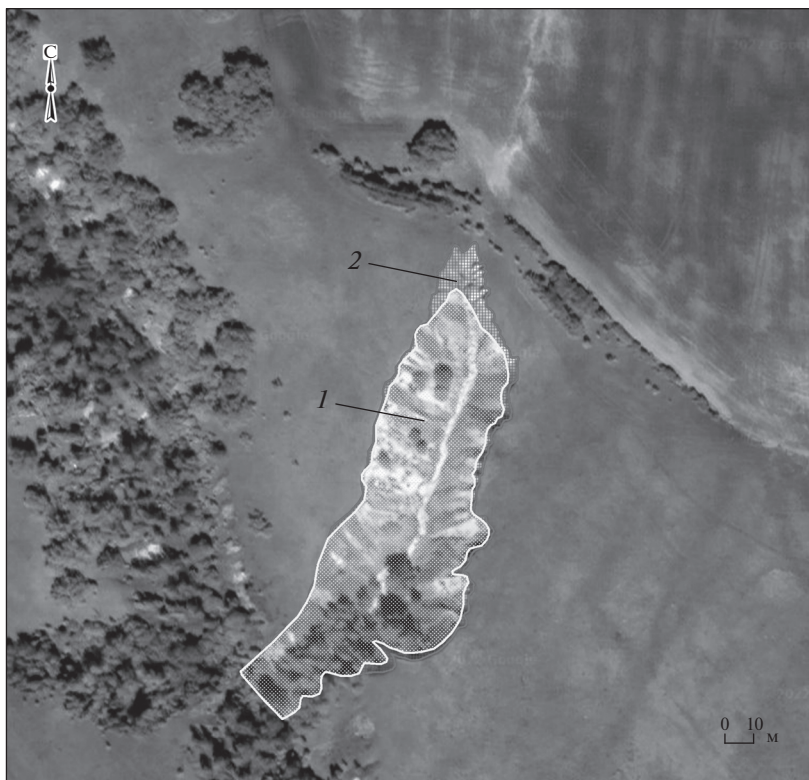


Рис. 8. Овраг № 1 вблизи с. Марфино. 1 – площадь оврага в 2005 г., 2 – площадной прирост оврага с 2005 по 2021 гг.

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

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

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

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

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

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

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

В то же время в верхнем, промоинном звене, происходят значительные трансформации. Дешифрирование струйчатых размывов, проведенное на 70 ключевых участках по космическим снимкам “Landsat” за 1984–2017 гг. на пашне в лесной, лесостепной и степной зонах востока Русской равнины показало, что за этот период в направлении от юга лесной подзоны к лесостепным и степным ландшафтам наблюдается резкое увеличение как плотности, так и густоты промоинной сети (в среднем в 4.6 и 10 раз соответственно). Продвижение пояса струйчатой эрозии идет в сторону водораздела за счет образования новых размывов в верхних частях промоинной сети и ее удлинения, при этом наблюдается заметное сокращение ширины эрозионно-слабоактивного пояса – микролучековой эрозии [34].

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

20. Цветков М.А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год / М.А. Цветков. - М., Изд-во Акад. Наук СССР. 1957. 213 с.
21. Чибилёв А.А., Мелешкин Д.С., Григорьевский Д.В. Современное состояние земель и сельскохозяйственных угодий регионов степного пояса России // Вопросы степеведения. 2021. № 2. С. 72–81.
22. Яшков И.А. Состояние изученности овражной эрозии на территории Саратова и его окрестностей / И.А. Яшков, А.С. Шешнёв, А.В. Иванов // Известия Саратовского университета. 2008. Т. 8 (2). С. 30–35.
23. Blong R.J., Graham O.P., Veness J.A. The role of sidewall processes in gully development // Earth Surface Processes and Landforms. 1982. № 7. P. 381–385.
24. Bučko Š., & Mazúrová V. Gully erosion in Slovakia. Water erosion in Slovakia (Zachar, D. ed.). SAS Publishing, Bratislava. 1958. P. 68–101.
25. Castillo C. and Gómez J.A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches // Earth-Science Reviews. № 160. 2016. P. 300–319. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
26. De Foucault B., Colbeaux J.P., Bonnet T., Brac P., Courtecuisse R., Debuyser M., Louche B. (1997). Les creuses de la region Nord/Pas-de-Calais: premiers resultats d'etudes multi-criteres. Annales-société Geologique du Nord. № 5. P. 385–394.
27. Gawrysiak L., Harasimiuk M. Spatial diversity of gully density of the Lublin Upland and Roztocze Hills (SE Poland). Annales UMCS, sec. B LXVII (1). 2012. P. 27–43.
28. Golosov V., Yermolaev O., Rysin I., Vanmaercke M., Medvedeva R. and Zaytseva M. Mapping and Spatial-temporal Assessment of Gully Density in the Middle Volga Region. Russia Earth Surface Processes and Landforms. 2018. 43(13). P. 2818–34. <https://doi.org/10.1002/esp.4435>
29. Ghimire S.K., Higaki D., Bhattarai T. Gully erosion in the Siwalik Hills, Nepal: estimation of sediment production from active ephemeral gullies // Earth Surf. Process. Landf. 2006. 31. P. 155–165.
30. Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // Catena. 2006. № 68. P. 133–140.
31. Józefaciuk C. and Józefaciuk A. Struktura przestrzenna erozji wązowowej w Polsce. Pam. Puł. 1983. 79.
32. Kertész A. and Krecek J. Landscape degradation in the world and in Hungary. Hungarian Geographical Bulletin. 2019. № 68(3). P. 201–221. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.68.3.1>
33. Ohmori H., Speight J.G., Takeuchi K. Stratigraphic background of gully development of the Pekina catchment in the Mt. Lofty ranges, South Australia // Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University. 1986. № 21. P. 65–84.
34. Platoncheva E., Yermolaev O., Essuman-Quainoo B. Spatial-Temporal Dynamics of the Ephemeral Gully Belt on the Plowed Slopes of River Basins in Natural and Anthropogenic Landscapes of the East of the Russian Plain. Geosciences. 2020. № 10(5). 167. P. 17 <https://doi.org/10.3390/geosciences10050167>
35. Radoane M., Ichim I., Radoane N. Gully distribution and development in Moldavia, Romania. Catena. 1995. 24(2), 127–146.
36. Seginer I. Gully development and sediment yield // Journal of Hydrology. 1966. № 4. P. 236–253. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(66\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(66)90082-5)
37. Smith B.J. Effects of climate and land-use change on gully development: an example from northern Nigeria // Zeitschrift für Geomorphologie. 1982. № 44. P. 33–51.
38. Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Fernando J., Bezerra R., Bolysov S., Dvinskikh A., Frankl A., Fuseina Y., Guerra A., Haregewyn N., Ionita I., Imwangana F., Moeyersons J., Moshe I., Samani A., Niacsu L., Nyssen J., Otsuki Y., Radoane M., Rysin I., Ryzhov Y., Yermolaev O. How fast do gully headcuts retreat // Earth Science Reviews. 2016. № 154. P. 336–355. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
39. Vanmaercke M., Panagos P., Vanwallegghem T. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art, Earth-Science Reviews. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>
40. Yermolaev O., Medvedeva R., Poesen J. Spatial and temporal dynamics of gully erosion in anthropogenically modified forest and forest-steppe landscapes of the European part of Russia // Earth Surface Processes and Landforms, 2022. V. 47. Is. 12. P. 2926–2940. <https://doi.org/10.1002/esp.5433>
41. URL://http://bassepr.kpfu.ru/ (дата обращения: 01.08.2022).
42. URL://https://nationalatlas.ru/tom2/127-129.html?ysclid=18ft0aqone716051615/ (дата обращения: 01.09.2022).

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

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

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

REFERENCES

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

- losov, R.R. Zaljaliev, K.V. Efimov, A.A. Kondrat'eva, A.D. Kinjashova, Ju.K. Ionova // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2017. T. 14. № 6. S. 149–157.
8. Litvin L.F., Kirjuhina Z.P., Krasnov S.F., Dobrovolskaja N.G. Geografija dinamiki zemleledel'cheskoj jerozii pochv na Evropejskoj territorii Rossii // *Pochvovedenie*. 2017. № 11. S. 1390–1400.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
 9. Makarov V.Z., Volkov Ju.V., Bulanyj Ju.I., Prokazov M.Ju., Mukalo A.S. Unikal'nye stepnye prirodnye komplekсы dal'nego Saratovskogo Zavolzh'ja. – *Izv. Saratov. un-ta. Ser. Nauki o zemle*. Saratov. 2009. № 9 (1). S. 28–32.
 10. Medvedev I.F., Levickaja N.G., Makarov V.Z., Nazarov V.A. Aktivnost' jerozionnyh processov na chernozemah Povolzh'ja. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2016. № 8. S. 29–34.
 11. Ovrashnaja jerozija vostoka Russkoj ravniny / *Nauch. red. A.P. Dedkov. Kazan': Kazanskij un-t*. 1990. 140 c.
 12. Perevedencev Ju.P. Klimat i okružhajushhaja sreda Privolzhskogo federal'nogo okruga / Ju.P. Perevedencev, V.V. Sokolov, Je.P. Naumov i dr.; *nauch. Red. M.A. Vereshhagin. Kazan': Kazan. un-t*. 2013. 274 s.
 13. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitija sovremennyh processov prirodno-antropogennoj jerozii na Russkoj ravnine / *Pod. red. d.g.n. V.N. Golosova, d.g.n. O.P. Ermolaeva*. – Kazan': *Izd-vo AN RT*. 2019. 372 s.
 14. Prjahina S.I. Monitoring klimata Saratovskoj oblasti / S.I. Prjahina, Ju.N. Fridman, M.Ju. Vasil'eva // *Izvestija Saratovskogo universiteta*. 2006. T. 6. Serija Nauki o Zemle, vyp.1. S. 15–18.
 15. Ryzhov Ju.V. Formirovanie ovragov na juge Vostochnoj Sibiri. Novosibirsk: *Akademicheskoe izd-vo "Geo"*, 2015. 180 s.
 16. Sobolev S.S. Razvitie jerozionnyh processov na territorii Evropejskoj chasti SSSR i bor'ba s nimi / S.S. Sobolev. – M.: *Izd-vo AN SSSR*. 1948. 308 s.
 17. Stupishin A.V. Geograficheskij analiz ovrazhno-balochnyh sistem v predelah Tatarskoj ASSR / A.V. Stupishin, V.N. Duglav, N.N. Lapteva. – Kazan': *Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta*. 1980. 152 s.
 18. Usov N.I. Pochvy Saratovskoj oblasti. Ch.1. / N. I. Usov, prof. – Saratov : *Oblgiz*, 1948. 286 s.
 19. Frolova N.L. Vnutrigodovoe raspredelenie stoka ravninnyh rek Evropejskoj territorii Rossii i ego izmenenie / N.L. Frolova, M.B. Kireeva, S.A. Agafonova, V.M. Evstigneev, N.A. Efremova, E.S. Povalishnikova // *Vodnoe hozjajstvo Rossii*. 2015. № 4. S. 4–20.
 20. Cvetkov M.A. Izmenenie lesistosti Evropejskoj Rossii s konca XVII stoletija po 1914 god / M.A. Cvetkov. – M., *Izd-vo Akad. Nauk SSSR*. 1957. 213 s.
 21. Chibiljov A.A., Meleshkin D.S., Grigorevskij D.V. Sovremennoe sostojanie zemel' i sel'skohozjajstvennyh ugodij regionov stepnogo pojasa Rossii // *Voprosy stepovedenija*. 2021. № 2. S. 72–81.
 22. Jashkov I.A. Sostojanie izuchennosti ovrazhnoj jerozii na territorii Saratova i ego okrestnostej / I.A. Jashkov, A.S. Sheshnjov, A.V. Ivanov // *Izvestija Saratovskogo universiteta*. 2008. T. 8 (2). S. 30–35.
 23. Blong R.J., Graham O.P., and Veness J.A. The role of sidewall processes in gully development // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1982. № 7. P. 381–385.
 24. Bučko Š., & Mazúrová V. Gully erosion in Slovakia. *Water erosion in Slovakia* (Zachar, D. ed.). SAS Publishing, Bratislava. 1958. P. 68–101.
 25. Castillo C. and Gómez J.A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches // *Earth-Science Reviews*. № 160. 2016. P. 300–319.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
 26. De Foucault B., Colbeaux J.P., Bonnet T., Brac, P., Courtecuisse R., Debuyser M., Louche B. (1997). Les creuses de la region Nord/Pas-de-Calais: premiers resultats d'etudes multi-criteres. *Annales-société Geologique du Nord*. № 5. P. 385–394.
 27. Gawrysiak L., Harasimiuk M. Spatial diversity of gully density of the Lublin Upland and Roztocze Hills (SE Poland). *Annales UMCS, sec. B LXVII* (1). 2012. P. 27–43.
 28. Golosov V., Yermolaev O., Rysin I., Vanmaercke M., Medvedeva R., Zajtseva M. Mapping and Spatial-temporal Assessment of Gully Density in the Middle Volga Region. *Russia Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. 43(13). P. 2818–34.
<https://doi.org/10.1002/esp.4435>
 29. Ghimire S.K., Higaki D., Bhattarai T. Gully erosion in the Siwalik Hills, Nepal: estimation of sediment production from active ephemeral gullies // *Earth Surf. Process. Landf*. 2006. 31. P. 155–165.
 30. Ionita I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania // *Catena*. 2006. № 68. P. 133–140.
 31. Józefaciuk C., Józefaciuk A. Struktura przestrzenna erozji wąwozowej w Polsce. *Pam. Puł*. 1983. 79.

32. Kertész A., Krecek J. Landscape degradation in the world and in Hungary. *Hungarian Geographical Bulletin*. 2019. № 68(3). P. 201–221.
<https://doi.org/10.15201/hungeobull.68.3.1>
33. Ohmori H., Speight J.G., Takeuchi K. Stratigraphic background of gully development of the Pekina catchment in the Mt. Lofty ranges, South Australia // *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*. 1986. № 21. P. 65–84.
34. Platoncheva E., Yermolaev O., Essuman-Quainoo B. Spatial-Temporal Dynamics of the Ephemeral Gully Belt on the Plowed Slopes of River Basins in Natural and Anthropogenic Landscapes of the East of the Russian Plain. *Geosciences*. 2020. № 10(5), 167. P. 17 <https://doi.org/10.3390/geosciences10050167>
35. Radoane M., Ichim I., Radoane N. Gully distribution and development in Moldavia, Romania. *Catena*. 1995. 24(2), 127–146.
36. Seginer I. Gully development and sediment yield // *Journal of Hydrology*. 1966. № 4. P. 236–253.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(66\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(66)90082-5)
37. Smith B.J. Effects of climate and land-use change on gully development: an example from northern Nigeria // *Zeitschrift für Geomorphologie*. 1982. № 44. P. 33–51.
38. Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Fernando J., Bezerra R., Bolysov S., Dvinskih A., Frankl A., Fuseina Y., Guerra A., Haregeweyn N., Ionita I., Imwangana F., Moeyersons J., Moshe I., Samani A., Niacsu L., Nyssen J., Otsuki Y., Radoane M., Rysin I., Ryzhov Y., and Yermolaev O. How fast do gully headcuts retreat // *Earth Science Reviews*. 2016. № 154. P. 336–355.
<https://doi:10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
39. Vanmaercke M., Panagos P., Vanwallegghem T. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art, *Earth-Science Reviews*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>.
40. Yermolaev O., Medvedeva R., Poesen J. Spatial and temporal dynamics of gully erosion in anthropogenically modified forest and forest-steppe landscapes of the European part of Russia // *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022. V. 47. Is. 12. P. 2926–2940.
<https://doi.org/10.1002/esp.5433>
41. URL://<http://bassepr.kpfu.ru/> (data obrashheniya: 01.08.2022).
42. URL://<https://nationalatlas.ru/tom2/127-129.html?ysclid=18ft0aqone716051615> / (data obrashheniya: 01.09.2022).

ДИНАМИКА УРБАНИЗАЦИИ ПОЙМЕННО-РУСЛОВОГО И ТЕРРАСОВОГО КОМПЛЕКСОВ р. АНГАРЫ В ПРЕДЕЛАХ г. ИРКУТСКА

© 2022 г. М. Ю. Опекунова^{а, *}, А. Н. Воробьев^{а, **}

^аИнститут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: opek@mail.ru

**E-mail: tore12@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.05.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 02.12.2022 г.

Процессы урбанизации затрагивают все составляющие природной среды, часто вызывая экологическую напряженность, приводя к негативным последствиям для человека и его хозяйственной деятельности. Верхнее Приангарье – староосвоенная территория, испытывавшая всплеск урбанизации в результате строительства каскада ГЭС на Ангаре в период 1950–1980 гг. В этой связи важно иметь представление об изменениях структуры, динамике природных комплексов и населения территории на фоне процессов урбанизации. Статья посвящена комплексному анализу динамики рельефа и населения ключевого участка нижнего бьефа левобережья р. Ангары в г. Иркутска, основное внимание уделяется временному интервалу сначала строительства Иркутской ГЭС по настоящее время (1950–2022 гг.). На основе сопоставления разновременных аэрофотоснимков (АФС), космоснимков и топокарт проведена оценка динамики морфологии, изменения структуры проявления экзогенных процессов. Определенные количественные показатели (изменение площади элементов рельефа, объемы перемещенного грунта) позволили оценить высокие адаптивные свойства и устойчивость геоморфосистемы. Выделяются пять этапов формирования городской территории, отражающее освоение пространств территории исследования. Показана зависимость распределения плотности населения от морфотипов застройки территории, определяющая степень антропогенной нагрузки и геоморфологических рисков. Определено, что максимальное антропогенное воздействие со времени постройки ГЭС сместилось с пойменно-руслового на террасовый комплекс. Результаты исследований, могут применяться при крупномасштабном районировании по степени антропогенной нагрузки территорий.

Ключевые слова: речные долины, урбанизация, морфодинамика, ГЭС, Ангара, Иркутск, русловые процессы

DOI: 10.31857/S0869607122050081

ВВЕДЕНИЕ

Довольно продолжительное время внимание многих исследователей концентрируется в области трансформации природной среды под воздействием человека. Наиболее значимый преобразующий среду, окружающую процесс, – урбанизация. Процессы урбанизации рассматриваются с разных точек зрения наук о земле – урбанистики, географии населения, ландшафтоведения и других [8, 9].

Анализом биосферы, сформированной процессом урбанизации занимается геоморфология городских территорий [8, 9]. Согласно Э.А. Лихачевой и Д.А. Тимофееву

[9, 10] геоморфологический анализ урбосистем разделяется на три направления: 1) историко-эколого-геоморфологический анализ местообитания человека (рассматриваются связи геоморфологических условий на расселение, размещение промышленных объектов и наоборот); 2) особенности формирования и развития городских геоморфологических систем; 3) исследование пространственных переменных и территориальных систем урбосферы. В данной работе мы уделили внимание первым двум направлениям.

Верхнее Приангарье является территорией долговременного освоения человеком. В современный период промышленного этапа развития территория испытывает повышенную техногенную нагрузку, возникает необходимость мониторинга функционирования естественных геосистем, (либо вновь созданных техногеосистем) для рационального использования ресурсов, а также с целью прогнозирования и предотвращения неблагоприятных последствий, связанных как с естественными проявлениями процессов, так и с теми, которые могут быть спровоцированы деятельностью человека.

На данном этапе в связи с необходимостью рационального природопользования и планирования территории актуальными становятся исследования морфодинамики русел пойм и террасовых комплексов в пределах урбанизированных территорий, которые занимают довольно весомую долю в территории Верхнего Приангарья.

Цель исследований заключается в выявлении закономерностей и определении степени динамики геоморфосистем в процессе урбанизации за последние 70 лет.

Для достижения заявленной цели предлагается решение ряда задач:

- Выявить этапы формирования городской территории.
- Определить влияние внешних и внутренних факторов на процесс заселения г. Иркутска и освоения пространства.
- Определить структуру и динамические фазы развития геоморфосистем.

Город Иркутск один из старейших городов Восточной Сибири, имеет долговременную историю развития. Время основания Иркутского Острога, который потом и преобразовался в город, датируется 1661 годом, а статус города получен в 1686 году. Иркутск расположен в долинах реки Ангары и ее притоков – Иркуты, Ушаковки (Ида). Первоначально, площади застройки занимают в основном террасированные склоны долины Ангары в месте впадения ее притоков, по мере роста городских территорий захватывая более высокие гипсометрические уровни рельефа.

В данной статье предлагается рассмотреть изменение рельефа, структуры геоморфологических процессов г. Иркутска, на примере модельного района, расположенного в пределах современных микрорайонов Академгородок, Южный, Приморский, район ул. Майская (рис. 1).

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для урбанизированных, заселенных и территорий размещения промышленных объектов целесообразно выделение антропо-геоморфосистем [9–11] в которых комплексно оцениваются взаимосвязи и функционирование геоморфологических систем и населения. Методической и теоретической основой послужили разработки в области антропогенной геоморфологии [9–12, 22, 27] и картографирования географии населения [5, 16] и зарубежных [28–31] исследователей.

Для оценки территории проводятся: 1) историко-эколого-геоморфологический анализ местообитания человека (рассматриваются связи геоморфологических условий на расселение, размещение промышленных объектов и наоборот); 2) анализ особенностей формирования и развития городских геоморфологических систем [8, 9]. Исследования предлагают разработку в двух направлениях: эколого-геоморфологический анализ и рассмотрение территориальной организации населения.

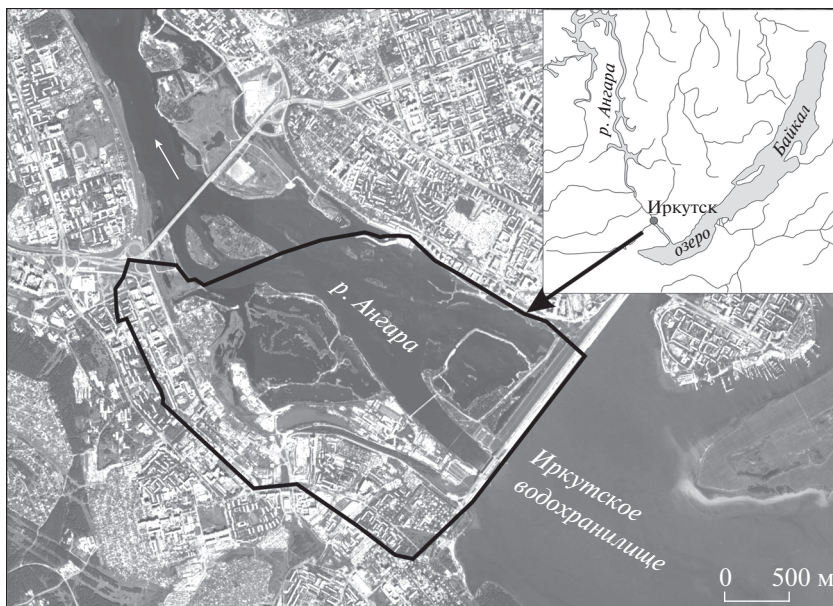


Рис. 1. Положение участка исследования. Черная линия – границы участка.

Fig. 1. Position of the study site. The black line is the boundaries of the plot.

Территория, выбранная в качестве модельного участка, представляет интерес с точки зрения преобразования рельефа, а также миграции населения вследствие строительства крупного промышленного объекта Иркутской ГЭС. В геоморфологическом плане участок занимает часть пойменно-руслового, а также террасовый комплексы р. Ангары, расположенные в нижнем бьефе Иркутского водохранилища. До строительства ГЭС в рамках границ территории исследования существовало село Кузьмиха, образованное в середине XVIII века.

Геоморфологическое строение, состав отложений пойменно-руслового комплекса р. Ангары в пределах участка исследования изучался по картографическим [3, 20] и литературным данным [1, 6, 18].

Анализ изменения структуры рельефа и экзогенных геоморфологических процессов проводился с помощью дешифрирования разновременных АФС 1950, 1980 годов масштаба $\approx 1 : 25000$ и космоснимков высокого разрешения. Для анализа современного состояния рельефа использовались ортофотопланы, полученные с помощью беспилотных летательных аппаратов (DJI Phantom Pro 4, Mavic Air), а также данные маршрутных наблюдений. Привязка геоизображений для каждого из этапов в единой системе координат и оцифровка проводилась в программных модулях MapInfo 15 и QGIS 3.12. В результате были получены серии геоморфологических карт, позволяющие оценить степень трансформации антропогеосистем, их динамических состояний на разных этапах развития.

Оценка численности населения проводилась для двух временных срезов: 1950 год (до постройки Иркутской ГЭС) и современный этап. Для 1950 года численность населения с. Кузьмиха, в виду отсутствия официальных статистических данных, рассчитывалось путем умножения количества дворов села на среднее количество людей в семье. Количество дворов определялось путем дешифрирования жилых домов с. Кузьмиха на АФС 1950 г., а средний размер сельской семьи по данным [19, 23] в начале

1950-х годов составлял четыре человека. По данным А.Г. Харчева, О.В. Вербицкой [4, 23] средний размер сельской семьи в довоенный период превышал 4 человека, что вполне соответствует данным переписи населения 1927 года [21], тогда количество жителей с. Кузьмиха составило 614 человек. Село находилось на крупнейшей транспортной артерии – через него проходила Транссибирская магистраль.

Для адекватного отображения современной численности населения исследуемой территории была разработана реляционная база данных застройки в реальных границах (площадной слой) с актуализацией на 1 января 2022 года. При ее создании учитывался предыдущий опыт изучения населения на региональном уровне [2]. Созданная база данных, содержит сведения о границах застройки, типах зданий, местонахождении в пространстве (адрес), классификации (типология) объектов недвижимости, этажность, год постройки, жилая площадь, количество квартир, количество жителей. Набор поименованных столбцов (полей) насчитывает 10 атрибутов.

Источниками атрибутивных данных послужили сведения с федерального сайта “Реформа ЖКХ” (<https://www.reformagkh.ru/>) [17]. Для подтверждения показателей, характеризующих жилищный фонд, нами было составлен запрос в администрацию г. Иркутска для актуализации информации о числе жителей, проживающих в частных домах. В результате чего нами была получена информация по среднему количеству жителей в частных домовладениях (в жилых домах) в Свердловском районе города Иркутска (2.66 жителя).

В дальнейшем уточненная реляционная база данных трансформирована в QGIS (программа с открытым исходным кодом для создания и визуализации геопространственной информации).

Для анализа распределения населения в пределах территории было проведено районирование территории по морфотипам застройки. Морфотип – это эволюционно сложившаяся разновидность планировочно-пространственной организации городской застройки [15]. Для районирования территории Академгородка по морфотипам застройки использовалась разработанная ранее типизация В.П. Дорофеева [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Относительные отметки современных поверхностей варьируют в пределах от 428 до 460 м. Большую часть занимает пойма, включая островную часть с отметками высот до 4 м над меженным урезом воды (рис. 2). Первая терраса высотой 4–8 м прослеживается в северо-западной части исследуемого участка и занимает до 20% от общей площади. Вторая и третья террасы с высотами до 15 и до 25 м соответственно довольно хорошо выражены и прослеживаются на всем протяжении участка. Юго-восточная часть участка представлена комплексом склоновых в основном делювиальных отложений, которые покрывают элементы террас и делают их морфологически невыраженными.

Помимо террасового комплекса важные элементы рельефа в пределах участка исследования – это долины постоянных и временных притоков р. Ангары – Кузьмихи, Кочумихи и Титова.

Пойменно-русловой тип р. Ангары до строительства ГЭС определяется как адаптированный разветвленный. Русловой (островной) тип разветвления классифицируется [24] как прибрежный чередующийся односторонний. Пойма чередующаяся (образована причленением побочной к руслу при его миграции от одного борта долины к другому) проточно-островного и ложбинно-островного типов.

Островная пойма – проточно-островного и ложбинного-островного типов, представляла собой островные массивы с площадями от 1 до 0.02 км², разделенные пойменными протоками. Ширина пойменных протоков варьировала от 15 до 170 м.

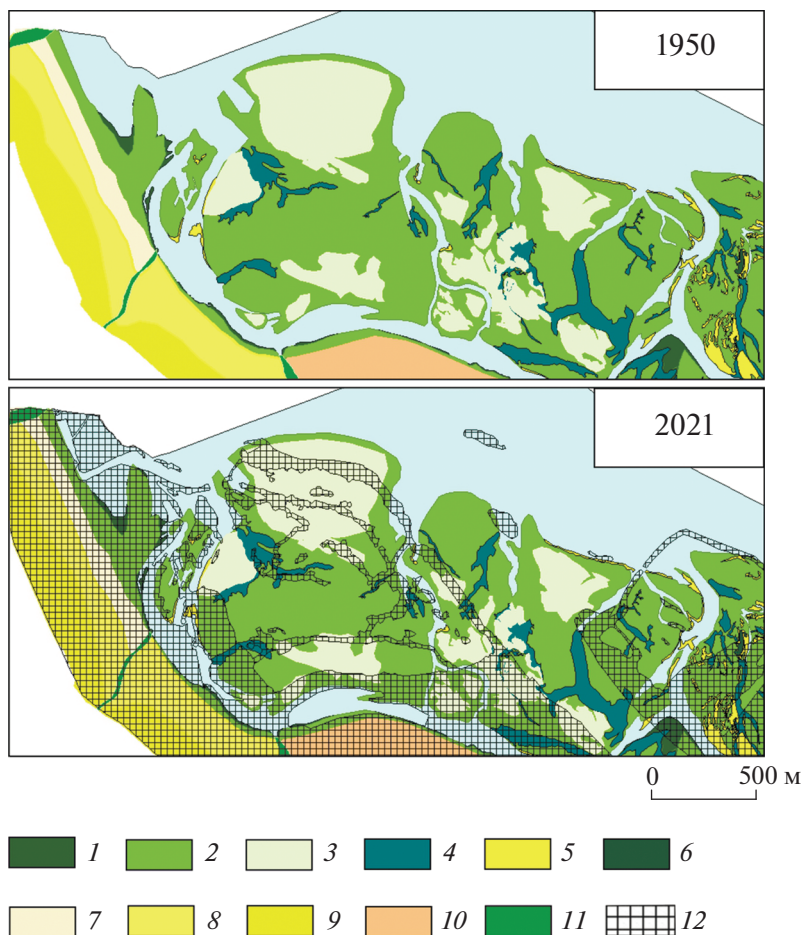


Рис. 2. Геоморфологические схемы участка исследования 1950 и 2021 гг. Условные обозначения: 1 – низкая пойма; 2 – средняя пойма; 3 – высокая пойма; 4 – ложбины стока, следы размывов; 5 – песчано-галечниковые наносы; 6 – гривы; 7 – первая терраса; 8 – вторая терраса; 9 – третья терраса; 10 – полигенетическая поверхность, сложенная делювиально-аллювиальными отложениями; 11 – долины постоянных и временных водотоков; 12 – техногенно-преобразованная современная поверхность территории исследования.

Fig. 2. Geomorphological schemes of the study area in 1950 and 2021. Legend: 1—low floodplain; 2—middle floodplain; 3—high floodplain; 4—runoff hollows, traces of erosion; 5—sand-pebble sediments; 6—manes; 7—first terrace; 8—second terrace; 9—third terrace; 10—polygenetic surface composed of deluvial-alluvial deposits; 11—valleys of permanent and temporary watercourses; 12—technogenically transformed floodplain surface. Geomorphological schemes of the study area in 1950 and 2021.

В настоящее время после строительства ГЭС, образования водохранилища, в нижнем бьефе русловой тип ниже участка не изменился. Однако строительство такого объекта спровоцировало рост урбанизации, которая повлияла на трансформацию рельефа. Непосредственно в пределах участка произошла наибольшая трансформация морфологических элементов пойменно-руслового комплекса, причем максимальным изменениям подверглась островная часть (рис. 2).

Площадь островов, в 1950 г. составляла 2,7 км², в результате выемки грунта при строительстве плотины сократилась на 33,4%.

В настоящее время после строительства ГЭС и образования водохранилища, территория, которую занимала группа Кузьмихинских островов, представляет техногенные образования. Непосредственно массив острова Кузьмихинский был выбран для добычи гравийно-галечной смеси. В настоящее время – это искусственное насыпное образование, представляющее собой дугообразные сегменты суши, которые использовались в качестве технологических дорог, разделенных затопленными карьерами. Сейчас данный участок (район Теплых озер) используется в рекреационных целях жителями близлежащих микрорайонов.

Значительные изменения морфологии, утрата определенных элементов и частей рельефа произошли лишь в пределах пойменно-руслового комплекса. В границах террасового комплекса изменения сопряжены с процессами застройки и по сравнению с морфологическими изменениями пойменно-островного комплекса не столь значительны.

В настоящее время наибольший техногенный прессинг испытывает террасовый комплекс, так как большая часть пойменно-руслового комплекса занята землями рекреационного назначения.

Помимо изменения морфологических особенностей рельефа важным фактором изменения структуры процессов рельефообразования становятся техногенные отложения. Рассчитанный объем современных техногенных отложений составляет 22,48 млн м³, из них, объем плотины Иркутской ГЭС 20 млн м³. Фактические данные об объемах перемещенного грунта при строительстве плотины ГЭС приведены по [13], объемы перемещенного грунта застроенных территорий при строительстве Академгородка рассчитаны авторами с использованием существующих нормативных документов для строительства¹. Объемы перемещенного грунта при застройке территории в пределах террасового комплекса составило 2,48 млн м³.

В пределах территории исследования доминирующее положение занимают техногенные грунты как природные образования, измененные в условиях естественного залегания [1]. Техногенные грунты являются благоприятной средой развития эрозионных, суффозионно-эрозионных, суффозионно-просадочных и оползневых процессов.

Нижний бьеф плотины Иркутской ГЭС – зона направленной эрозии [14]. Непосредственно в пределах участка исследования прямого воздействия строительства Иркутской ГЭС на активизацию склоновых процессов не зафиксировано. Однако, ряд авторов [1, 6, 18] отмечают высокий потенциал развития опасных процессов (в том числе и склоновых), повышения сейсмичности при многоэтажной застройке в прибрежных частях высоких террас.

Для территории исследования на современном этапе характерно развитие гравитационно-склоновых; флювиальных, эрозионных процессов и заболачивания. При этом вероятность развития суффозионно-просадочных и эрозионных процессов, подтопления территории здесь характеризуется как высокая, а гравитационно-склоновых процессов – средняя [18]. Возможна активизация плоскостного смыва, крипа при общем обводнении, повышении уровня поверхностных вод территории.

Динамика населения В рамках исследования за последние 70 лет нами было выделено пять хронологических этапов развития территории:

1 этап преобразования территории связан со строительством Иркутской ГЭС, которое началось в феврале 1950-го года. Село Кузьмиха послужило опорным плацдармом для стройки Всесоюзного масштаба. Тогда же строителями (гидростроителями) полевые дороги были трансформированы в современную улицу Старокузьмихинскую для

¹ «СП 45.13330.2017. Свод правил. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87».

оперативного соединения стройки с Иркутским железнодорожным узлом. Первые строители были вынуждены разместиться в г. Иркутске и с. Кузьмихе. В дальнейшем предполагалось строительство как временных, так и постоянных поселков для проживания строительных кадров. Максимальная численность строительных кадров была достигнута в 1956 году, составив 7650 человек. На территории современной ул. Майская был построен поселок Новая Кузьмиха с жилой площадью 5818 м². В поселке первые годы проживал инженерно-технический персонал и до 1955 года находилось управление строительства. Поселок имел в основном одноэтажную застройку рублеными и каркасными (финскими) домами, до наших дней они не сохранились. Остались лишь двухэтажные восьмиквартирные дома. Ближайший к ГЭС, 1-й поселок предполагался для размещения эксплуатационных работников. Площадь жилого фонда поселка составляла 10394 м². Застройка состояла преимущественно из однотипных каменных двухэтажных восьмиквартирных домов. Исключением является одна из улиц поселка, застроенная многоквартирными одноэтажными домами по ул. Гидростроителей. Внутренняя часть поселка застроена двухэтажными типовыми домами проекта Б-8-50. Итогом первого этапа были строительство и ввод Иркутской ГЭС, создание при ней поселков, перенос железной дороги с отворотом от Ангары около д. Титово [13].

Промежуточным этапом можно выделить строительство нового здания Иркутского политехнического института (ИРНИТУ) и Студгородка. Это косвенно повлияло на продление жилой застройки левого берега р. Ангары (Глазковского предместья) до деревни Титово.

2 этап связан со строительством Иркутского Академгородка. У поселков ГЭС был один очень большой недостаток – они были удалены от основной части г. Иркутска. В 1960-х годах на левом берегу р. Ангары начали строить Академгородок, который послужил своего рода соединительным мостом между поселками гидростроителей и существующими частями г. Иркутска (Глазково). Соответствующие этому периоду морфотипы застройки здесь преимущественно строчного типа с трех-пятиэтажными домами, ориентированными параллельно долине р. Кузьмиха.

3 этап связан с возникновением новых микрорайонов, вслед за ростом производственных объектов и соответственно штата работников. Для обеспечения людей жильем, в конце 1960-х годов началась застройка микрорайона “Приморский” и “Южная” (получивший одноименное название с электрической подстанцией “Южная”). Возведенные микрорайоны с застройкой пятиэтажными домами, которые образовывали преимущественно структуры полузамкнутого типа [7], практически сразу становились транспортно-доступными и связывались линиями общественного транспорта с другими районами города. С этого момента можно считать, что данная территория была окончательно интегрирована в городскую среду Иркутска. Именно этот жилищный капитал, оставшийся после постройки Иркутского гидроузла, а также новые микрорайоны послужили базой для дальнейшего роста населения на этой территории.

4 этап связан с увеличением этажности строящихся домов. В дальнейшем существенный прирост населения, вслед за вводом жилых площадей, произошел на рубеже 1980-х–1990-х гг. в этот период производилось строительство девятиэтажных домов с большим количеством квартир в Академгородке между нынешней ул. Мелентьева и ул. Старокузьмихинской. Возведенные здания группировались в виде строчной застройки параллельно и перпендикулярно береговой линии. Компановка кварталов – полузамкнутого типа.

5 этап – современный. В этот период происходит застройка многоэтажными домами пустырей в существующих микрорайонах. С середины 90-х вплоть до середины 2010-х годов территория находилась фактически в неизменном виде, когда началась точечная застройка на имеющихся пустырях в существующих микрорайонах многоэтажными жилыми домами с этажностью от 9 до 16 этажей. Это привело к увеличению

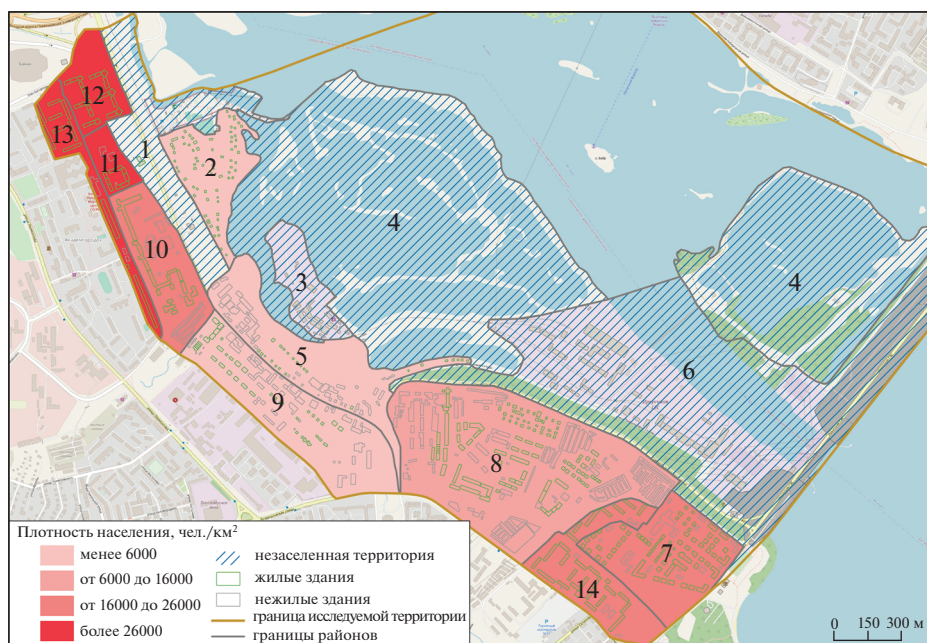


Рис. 3. Плотность населения в пределах территории исследования.

Fig. 3. Population density within the study area.

численности жителей (примерно) в 1.5 раза. Застройки здесь преимущественно замкнутого и полужамкнутого типов.

Количество жителей территории исследования возросло с 350 в 1950 году до 21443 в 2020, плотность населения возросла с 66 чел./км² до 5096 чел./км².

Районирование территории исследования по морфотипам застройки

В пределах территории исследования в зависимости от геолого-геоморфологических условий и гипсометрической позиции выделены три геоморфосистемы: Прибрежная и Нижняя Террасовая, Верхняя Террасовая (табл. 1).

В пределах геоморфосистем расположены 14 районов, выделенные по преобладающему морфотипу застройки.

На современном этапе развития территории плотность населения отражает степень урбанизированности территории, так как на этот показатель влияет ряд факторов: этажность зданий, людность, опосредованно: развитость инфраструктуры, транспортная нагрузка. Распределение значений плотности населения в пределах территории исследования зависит от характера и типа застройки (рис. 3).

Воздействие статических нагрузок, создаваемых, в том числе многоэтажными жилыми зданиями, насыпями, изъятием грунтов из массива, а также динамическими нагрузками от транспорта вызывает нарушение напряженного состояния грунтовых массивов [1]. Территории с плотной многоэтажной застройкой наиболее подвержены подобным статистическим нагрузкам, что является дополнительным фактором развития негативных геоморфологических процессов по сравнению с районами с низкой плотностью населения и другими типами застройки.

Таблица 1. Районы территории исследования и их основные характеристики
Table 1. Areas of the study area and their main characteristics

№	Район	Население, чел.	Площадь, км ²	Плотность населения
Прибрежная				
1	Спорт парк “Поляна”	Отсутствует	0.25	–
2	“Нахаловка” (ул. Овражная и ул. Костромская)	180	0.14	1286
3	“Бетонный завод”	Отсутствует	0.09	–
4	“Теплые озера”, “Квадрат”	Отсутствует	2.02	–
5	“Старая Кузьмиха”	60	0.24	250
6	Плотинный	Отсутствует	1.24	–
Нижняя террасовая				
7	“Поселок Гидростроителей”	1365	0.22	6205
8	“Южная”	4790	0.61	7852
9	“Новая Кузьмиха”	1042	0.28	3721
10	Восточная сторона ул. Мелентьева (старый фонд Академгородка)	3133	0.16	19581
11	ТСЖ “Кузьмиха” (новый фонд Академгородка)	1193	0.04	2982
12	ЖК “Сигма” (новый фонд Академгородка)	2693	0.09	29922
Верхняя террасовая				
13	Западная сторона ул. Мелентьева (старый фонд Академгородка)	2867	0.1	28670
14	“Приморский”	4120	0.16	25750

Таким образом, на современном этапе развития геоморфосистемы морфотип застройки в той или иной степени отражает черты ее функционирования.

В Прибрежную геоморфосистему входят пойменно-русловый комплекс, а также первая терраса, сложенные валунно-галечными и техногенными отложениями. Пойменно-русловые комплексы наиболее гибкие и в то же время уязвимые к антропогенному вмешательству системы [25]. Выделенные районы (табл. 1), так или иначе граничащие с водой, исторически включают объекты преимущественно промышленного (возведенные в период строительства ГЭС) и рекреационного назначения, которые появились позже. Распространенные здесь геоморфологические процессы, в том числе, опасные, активизация которых возможна при увеличении антропогенной нагрузки – это флювиальный, оползание в уступах пойм и террасы, дефляция на оголенных поверхностях, заболачивание. Однако в пределах этой территории размещены жилые объекты частного сектора и нежилые промышленные объекты с низкой плотностью населения. Более того, в центральной части в пределах района “Старая Кузьмиха” (5) в настоящее время происходит замещение жилых домов частного сектора объектами

хозяйствования автомобильного сектора. Потенциальная активизация экзогенных процессов вследствие антропогенной нагрузки здесь незначительна.

Нижняя террасовая геоморфосистема включает в восточной части частично объединенный террасовый комплекс, а в западной – комплекс второй и третьей террас, которые слагают техногенные, делювиальные и аллювиальные отложения.

В пределах этой геоморфосистемы расположены районы Академгородка с максимальными значениями плотности населения “ЖК Сигма” (12), ТСЖ Кузьмиха (11) с высокоэтажной застройкой замкнутого и полужамкнутого типов [7]. Данные территории можно отнести к потенциально опасным в первую очередь, для развития суффозионно-просадочных процессов, так как они характеризуются развитием техногенных грунтов, часто недоуплотненных [1], высокой плотностью водонесущих коммуникаций, вибрационной транспортной нагрузкой. Средними значениями плотности населения характеризуются районы “Южная” (8) с преимущественно пятиэтажной строчной застройкой, “Поселок Гидростроителей” (7). Потенциальная активизация экзогенных процессов вследствие антропогенной нагрузки здесь незначительна.

Верхняя террасовая геоморфосистема в восточной части частично включает объединенный террасовый комплекс, в пределах которого распространены техногенные и делювиальные покровные отложения. Западная часть представлена комплексом второй-третьей террас, сложенных техногенными, делювиальными, аллювиальными отложениями.

Максимальная плотность населения на современном этапе фиксируется в районах “Западная сторона ул. Мелентьева” (13) с протяженной девятиэтажной застройкой на поверхностях второй, третьей и объединенном комплексе террас и “Приморский” (14), в которых преобладает строчная застройка жилых групп [6]. Активизация экзогенных процессов вследствие антропогенной нагрузки также может быть отнесена к потенциально опасным.

Динамичность экзогенных геоморфологических процессов исследуемой территории может быть повышена в пределах ареалов с максимальными значениями плотности населения, в том числе и при изменении естественных условий, например, обводненности территории вследствие усиления циклонической деятельности [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долинный комплекс реки Ангары в пределах территории исследования свойств геоморфологической системы обладает высокой степенью адаптационных свойств (в большей степени этим обладает пойменно-русловый комплекс), поэтому преобразование территории можно рассматривать как трансформации геоморфосистемы. Анализ рассмотренного фактического материала позволил сделать следующие выводы:

1) Большую роль в сохранении морфологической устойчивости, формировании новых функциональных связей сыграло грамотное планирование и размещение объектов на первых этапах развития территории вовремя и сразу после строительства Иркутской ГЭС.

2) Выделенные пять этапов развития территории отражают процессы освоения и заселение городского пространства, среди которых: строительство ГЭС, Академгородка, Студгородка, микрорайона Приморский, увеличение этажности зданий, возведение ЖК на современном этапе.

3) Пространственное распределение населения определяется морфотипами застройки территории. Максимальная плотность населения фиксируется в пределах районов с многоэтажной застройкой, расположенных в пределах террасового комплекса. Минимальная – в пределах наиболее техногенно-преобразованного пойменно-руслового комплекса. Распределение максимальной и минимальной антропоген-

ной нагрузки коррелирует с концентрацией плотности населения. Максимальную испытывают террасовые геоморфосистемы, минимальную – Прибрежная.

4) Приведенный алгоритм исследований, может применяться при крупномасштабном районировании территории по степени антропогенной нагрузки, а также зонировании территории в рамках работ по минимизации негативных процессов и рационального природопользования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы, по комплексной оценке, трансформации геоморфосистем проводились в рамках государственных заданий АААА-А21-121012190017-5, АААА-А21-121012190063-2 и финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-44023 Монг_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулова В.В., Грудинин М.И., Рященко Т.Г., Демьянович Н.И. Геоэкологические проблемы города Иркутска // Изв. ИГУ. “Науки о Земле” 2008. Т. 1. № 1. С. 22–32.
2. Бардаш А.В., Воробьев А.Н. Составление базы данных населенных пунктов Иркутской области // География и геоэкология на службе науки и инновационного образования: материалы XII Международной научно-практической конференции / Красноярский гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева. Красноярск, 2017. С. 246–249.
3. Божинский А.П. К истории четвертичного периода Прииркутского участка долины реки Ангары // Бюл. МОИП. Отд. геологии. 1939. Т. 17. вып. 6. С. 187–202.
4. Вербицкая О.М. Население российской деревни в 1939–1959 гг.: Проблемы демограф. Развития. М.: Ин-т рос. истории РАН, 2002. – 318 с.
5. Воробьев А.Н. Урбанизированные ареалы / Отв. ред. Л.М. Корытный. // Зона Транссиба как евразийский экономический коридор. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 103–106.
6. Демьянович Н.И. Особенности Ангарских террас как территориального ресурса Иркутска // География и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 100–106.
7. Дорофеев П. Микрорайонные структуры 1960–1970-х годов в Иркутске: // Проект Байкал № 39–40 (2014) // ProjectBaikal.com: [сайт журнала Проект Байкал] URL: Микрорайонные структуры 1960–1970-х годов в Иркутске | проект байкал (projectbaikal.com) (дата обращения: 10.10.2020)
8. Лаппо Г.М. География городов. М.: Владос, 1997. 481 с.
9. Лихачёва Э.А. Город – антропогенная геоэкологическая система // Геоморфология городских территорий: конструктивные идеи / Отв. ред. ЛИХАЧЁВА Э.А. М.: Медиа-ПРЕСС, 2017. С. 11–22.
10. Лихачева Э.А., Тимофеев Д.А. Экологическая геоморфология. Словарь-справочник. М.: Медиа-ПРЕСС, 2004. 240 с.
11. Лихачева Э.А., Тимофеев Д.А. Геоморфологические системы и их организованность. Геоморфология. 2007; (1): 3–9.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2007-1-3-9>
12. Маккавеев А.Н., Лихачева Э.А., Некрасова Л.А. Антропогенная трансформация водосборных бассейнов малых рек / Геоморфология городских территорий: конструктивные идеи / Отв. ред. Лихачева Э.А. М.: Медиа-Пресс, 2017. С. 70–79.
13. Моисеев С.Н. Строительство Иркутской ГЭС на Ангаре. М; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1959. 190 с.
14. Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зонах влияния ангаро-енисейских водохранилищ. Новосибирск: Наука, 1999. 254 с.
15. Пасхина М.В. Выявление, типология и оценка городских морфотипов (на примере г. Ярославля) // Ярославский педагогический вестник. Естественные науки. 2012. Т. 3. № 4. С. 245–250.
16. Полян П.М. Дазиметрические карты В.П. Семенова-Тян-Шанского и перспективы их построения и использования в информационном поле XXI века // Известия РАН. Серия географическая. 2012. № 6. С. 98–106.
17. Реформа ЖКХ: автоматизированная информационная система. [2010] // URL: <https://www.refogmagkh.ru/> (дата обращения: 05.10.2021).
18. Рыбченко А.А. Инженерно-геодинамическая оценка современного состояния геологической среды г. Иркутска: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. 18 с.
19. Рыбаковский Л.Л. Динамика и факторы демографического развития СССР во второй половине XX века // Демографическое развитие СССР в послевоенный период / АН СССР, Ин-

- т социол. исслед., Сов. социол. ассоц. ; [отв. ред. В.Н. Иванов, Л.Л. Рыбаковский]. М. 1984. С. 4–24.
20. *Сироткин Л.А.* Инженерно-геологические условия района г. Иркутска и их изменения при строительстве и эксплуатации сооружений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геол.-мин. наук, Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1965. 347 с.
 21. Список населенных мест Иркутского округа Сибирского края по материалам переписи 1926 года). Иркутск: Ирк. Тип. Изд. “Власть труда”. 1927. 140 с.
 22. *Тащи С.М., Мясников Е.А.* Геолого-геоморфологические системы территории агломерации Владивосток – Артем: Учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. 181 с.
 23. *Харчев А.Г.* Браки и семьи в СССР. М.: Изд-во “Мысль”, 1979. 367 с.
 24. *Чалов Р.С., Чалова А.С., Голубцов Г.Б.* О терминологии и классификации разветвленных русел. // Геоморфология. 2021. № 3. С. 48–63.
 25. *Чернов А.В.* География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М.: Крона, 2009. 682 с.
 26. *Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г.* Наводнения в Иркутской области 2019 года // Водное хозяйство России. 2019. № 6. С. 48–65. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-6-4>
 27. *Шварев С.В., Лихачева Э.А., Аникина Н.В., Некрасова Л.А.* Оценка организованности антропогенно-геоморфологических систем Новой Москвы на основе синтеза экспертных и статистических оценок // Геоморфология. 2017. № 2. С. 25–37.
 28. *Elvidge C.D., Cinzano P., Pettit D.R., Arvesen J., Sutton P., Small C., Nemani R., Longcore T., Rich C., Safran J., Weeks J., Ebener S.* (2007) The Nightsat mission concept. *International Journal of Remote Sensing* 28, 12, pp. 2645–2670.
 29. *Kim S.* (2019) Urban development and landscape change in the Yangtze River Delta region in China, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26:2, 141–153. <https://doi.org/10.1080/13504509.2018.1509152>
 30. *Magliulo P., Cusano A.* Geomorphology of the Lower Calore River alluvial plain (Southern Italy) // *Journal of Maps*, 2016 <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1132277>
 31. *Nawieśniak-Caesar Maria, Wilkosz-Mamcarczyk Magdalena, Hernik Józef, Gorzelan, Julia, Gorzelany-Dziadkowiec Magdalena* An integrated approach to river valley revitalisation // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2019, V. 27. Is. 1. pp. 22–32. <https://doi.org/10.3846/jelms.2019.7481>

Experience in Studying the Urbanization of Valley Geomorphosystems at the Local Level (on the Example of Irkutsk)

M. Yu. Opekunova¹, * and A. N. Vorobyov¹, **

¹*V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia*

**E-mail: opek@mail.ru*

***E-mail: tore12@yandex.ru*

Abstract—Urbanisation processes affect all components of the natural environment, often causing ecological tensions, leading to negative consequences for humans and their economic activities. Upper Angara region is an old-developed which experienced an upsurge of urbanization after the construction of the Angara HPP cascade HPP cascade on the Angara River in the period of 1950-1980. In this context it is important to have an idea of the structure and dynamics of the natural complexes and population of the territory against the background of urbanization processes. The article is devoted to the complex analysis of the relief and population dynamics in the key area of the downstream bank of the Angara river in Irkutsk. The main attention is paid to the time interval from the beginning of the Irkutsk hydro power station construction till now (1950-2022). Based on the comparison of multi-temporal aerial photographs (AFS), satellite images and topographic maps, the dynamics of morphology, changes in the structure of exogenous processes. Certain quantitative indicators (change in the area of relief elements, volumes of the displaced soil) allowed to estimate high adaptive properties and stability of the geomorphosystem. Five stages of the formation of the urban area, reflecting the development of the space of the study area. The dependence of the population density distribution on morphotypes of building-up of the territory, determining a degree of the anthropogenic loading and geomorphologic risks. It is determined that the maximum anthropogenic impact has shifted from the floodplain-channel complex to the

terrace complex since construction of the HPP. Results of researches, can be applied at large-scale zoning on a degree of anthropogenic impact of territories.

Keywords: river valleys, city, morphodynamics, HPP, population, island, Angara-river, transformation

REFERENCES

1. Akulova V.V., Grudin M.I., Rjashhenko T.G., Dem'janovich N.I. Geojekologicheskie problemy goroda Irkutsk // *Izv. IGU. "Nauki o Zemle"* 2008. T. 1. № 1. S. 22–32.
2. Bardash A.V., Vorob'ev A.N. Sostavlenie bazy dannyh naselennyh punktov Irkutskoj oblasti // *Geografija i geojekologija na sluzhbe nauki i innovacionnogo obrazovanija: materialy XII Mezh-dunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii / Krasnojarskij gos. ped. un-t im. V.P. Astaf'eva. Krasnojarsk, 2017. S. 246–249.*
3. Bozhinskij A.P. K istorii chetvertichnogo perioda Priirkutskogo uchastka doliny reki Angary // *Bjul. MOIP. Otd. geologii.* 1939. T. 17. vyp. 6. S. 187–202.
4. Verbickaja O.M. Naselenie rossijskoj derevni v 1939–1959 gg.: Problemy demograf. Razvitija. M. : In-t ros. istorii RAN, 2002. – 318 s. :
5. Vorob'ev A.N. Urbanizirovannye arealy / *Otv. red. L.M. Korytnyj // Zona Transsiba kak evrazijskij jekonomicheskij koridor. – Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2016. S. 103–106.*
6. Dem'janovich N.I. Osobennosti Angarskih terras kak territorial'nogo resursa Irkutskaja // *Geografija i prirodnye resursy.* 2007. № 1. S. 100–106.
7. Dorofeev P. Mikrorajonnye struktury 1960–1970-h godov v Irkutске: // *Proekt Bajkal № 39–40 (2014) // ProjectBaikal.com: [sajt zhurnala Proekt Bajkal] URL: Mikrorajonnye struktury 1960–1970-h godov v Irkutске | proekt bajkal (projectbaikal.com) (data obrashhenija: 10.10.2020).*
8. Lappo G.M. *Geografija gorodov.* M.: Vldos, 1997. 481 s.
9. Lihachjova Je.A. Gorod – antropogennaja geojekosistema // *Geomorfologija gorodskih territorij: konstruktivnye idei / Otv. red. LIHACHJOVA Je.A. M.: Media-PRESS, 2017. S. 11–22.*
10. Lihacheva Je.A. Timofeev D.A. *Jekologicheskaja geomorfologija. Slovar'-spravochnik.* M.: Media-PRESS, 2004. 240 s.
11. Lihacheva Je.A., Timofeev D.A. Geomorfologicheskie sistemy i ih organizovannost'. *Geomorfologija.* 2007; (1): 3–9. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2007-1-3-9>
12. Makkaveev A.N., Lihacheva Je.A., Nekrasova L.A. Antropogennaja transformacija vodosbornyh bassejnov malyh rek / *Geomorfologija gorodskih territorij: konstruktivnye idei / Otv. red. Lihacheva Je.A. M.: Media-Press, 2017. S. 70–79.*
13. Moiseev S.N. *Stroitel'stvo Irkutskoj GJeS na Angare.* M; L.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1959. 190 s.
14. Ovchinnikov G.I., Pavlov S.H., Trzhcinskij Ju.B. *Izmenenie geologicheskoy sredy v zonah vlijanija angaro-enisejskih vodohranilishh.* Novosibirsk: Nauka, 1999. 254 s.
15. Poljan P.M. Dazimetricheskie karty V.P. Semenova–Tjan–Shanskogo i perspektivy ih postroenija i ispol'zovanija v informacionnom pole XXI veka // *Izvestija RAN. Serija geograficheskaja.* 2012. № 6. S. 98–106.
16. Pashina M.V. Vyjavlenie, tipologija i ocenka gorodskih morfotipov (na primere g. Jaroslavlja) // *Jaroslavl'skij pedagogicheskij vestnik. Estestvennye nauki.* 2012. T. 3. № 4. p. 245–250.
17. Reforma ZhKH: avtomatizirovannaja informacionnaja sistema. [2010] // URL: <https://www.reformmagkh.ru/> (data obrashhenija: 05.10.2021).
18. Rybchenko A.A. *Inzhenerno-geodinamicheskaja ocenka sovremennogo sostojanija geologicheskoy sredy g. Irkutskaja: avtoref. diss. ... kand. geol.-min. nauk.* Irkutsk: IZK SO RAN, 2009. 18 s.
19. Rybakovskij L.L. *Dinamika i faktory demograficheskogo razvitija SSSR vo vtoroj polovine XX veka // Demograficheskoe razvitie SSSR v poslevoennyj period / AN SSSR, In-t sociol. issled., Sov. sociol. assoc. ; [otv. red. V.N. Ivanov, L.L. Rybakovskij]. M. 1984. S. 4–24.*
20. Sirotkin L.A. *Inzhenerno-geologicheskie uslovija rajona g. Irkutskaja i ih izmenenija pri stroitel'stve i jekspluatacii sooruzhenij. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geol.-min. nauk,* Irkutsk: IZK SO AN SSSR, 1965. 347 s.
21. *Spisok naselennyh mest Irkutskogo okruga Sibirskogo kraja po materialam perepisi 1926 goda).* Irkutsk: Irk. Tip. Izd "Vlast' truda". 1927. 140 s.
22. Tashhi S.M., Mjasnikov E.A. *Geologo-geomorfologicheskie sistemy territorii aglomeracii Vladivostok—Artem: Ucheb. posobie.* Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2003. 181 c.
23. Harchev A.G. *Brak i sem'ja v SSSR.* M.: Izd-vo "Mysl'", 1979. 367 s.
24. Chalov R.S., Chalova A.S., Golubcov G.B. *O terminologii i klassifikacii razvetvlenyh rusel // Geomorfologija.* 2021. № 3. S. 48–63.

25. Chernov A.V. *Geografiya I geoe'kologicheskoe sostoyanie rusel I poim rek Severnoi Evrazii* (Geography and geocological state of riverbeds and floodplains of Northern Eurasia.). Moscow: Krona (Publ.), 2009. 682 p.
26. Shalikovskij A.V., Lepihin A.P., Tiunov A.A., Kurganovich K.A., Morozov M.G. Navodneniya v Irkutskoj oblasti 2019 goda // *Vodnoe hozjajstvo Rossii*. 2019. № 6. S. 48–65.
<https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-6-4>
27. Shvarev S.V., Lihacheva Je.A., Anikina N.V., Nekrasova L.A. Ocenka organizovannosti antropogенно-geomorfologicheskikh sistem Novoj Moskvy na osnove sinteza jekspertnyh i statisticheskikh ocenok // *Geomorfologija*. 2017. № 2. S. 25–37.
28. Elvidge C.D., Cinzano P., Pettit D.R., Arvesen J., Sutton P., Small C., Nemani R., Longcore T., Rich C., Safran J., Weeks J., Ebener S. (2007) The Nightsat mission concept. *International Journal of Remote Sensing* 28, 12, pp. 2645–2670.
29. Kim S. (2019) Urban development and landscape change in the Yangtze River Delta region in China, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26 : 2, 141–153.
<https://doi.org/10.1080/13504509.2018.1509152>
30. Magliulo P., Cusano A. Geomorphology of the Lower Calore River alluvial plain (Southern Italy) // *Journal of Maps*, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2015.1132277>
31. Nawieśniak-Caesar Maria, Wilkosz-Mamcarczyk Magdalena, Hernik Józef, Gorzelan, Julia, Gorzelany-Dziadkowiec Magdalena An integrated approach to river valley revitalisation // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2019, V. 27. Is. 1. rr. 22–32.
<https://doi.org/10.3846/jeel.2019.7481>

СКВЕРЫ В ГОРОДАХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ: ПРИОРИТЕТНЫЕ ЭКОСИСТЕМНЫЕ ФУНКЦИИ И УСЛУГИ, СПОСОБСТВУЮЩИЕ АДАПТАЦИОННОМУ РАЗВИТИЮ И УСТОЙЧИВОСТИ ГОРОДОВ

© 2022 г. А. В. Евсеев^а, *, Т. М. Красовская^а, **

^аМосковский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: avevseev@yandex.ru

**E-mail: krasovskt@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

После доработки 05.08.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

Раскрывается роль городских скверов/небольших городских парков в повышении устойчивости городов в Арктическом регионе России. Модельными городами являются: Мурманск, Кировск, Воркута, расположенные на Европейском Севере России. Их современные эколого-географические характеристики различны, но зеленая инфраструктура имеет много общих черт, характерных для большинства арктических городов. Целью исследования явилась выявление специфических региональных экосистемных функций скверов/небольших городских парков, отличающиеся от таковых в более крупных парках в этом регионе. Скверы/небольшие городские парки в настоящее время в основном рассматриваются как рекреационные территории, хотя их функции одновременно создают важный баланс между социальными и природными городскими системами, поддерживая социальную ветвь городской устойчивости в некомфортных условиях проживания в Арктике. При этом информационные услуги экосистем (цветовые, эстетические, духовные и др.) имеют особое значение. Они обеспечивают условия для развития социальной сплоченности и формирования “чувства места”, позволяющего противостоять негативным социальным процессам, связанным с интенсивной миграцией, характерной для многих городов Российской Арктики. В условиях монохромных ландшафтов на протяжении долгой зимы, скромной цветовой палитры растительности летом, они снижают цветовой голодание у горожан, повышая комфортность условий проживания. Скверы/малые городские парки нуждаются в особом внимании муниципальных органов при развитии зеленой инфраструктуры.

Ключевые слова: Российская Арктика, зелёная инфраструктура городов, экосистемные функции, адаптационное развитие, социальная сплоченность

DOI: 10.31857/S0869607122050032

INTRODUCTION

Nowadays, urbanization is one of the leading processes in environmental transformation. The share of the urban population is about 56% and continues to increase. According to the UN forecast, 68% of the global population will live in cities by 2050. The urbanization process is underway on all continents with the only exception of the Antarctic. Arctic regions are involved in this process as well [17, 25, etc.] Sustainable urbanization is included in the sustainable development goals (sustainable cities and communities) adopted by the UN in 2015. The

New UN Urban Agenda pointed out the necessity to maintain and develop the social and ecological functions of cities, reduce their vulnerability to natural and anthropogenic disaster risks and mitigate climate change [27].

Recently this system approach was transformed to recognize the existence of socioeconomic, natural and technical systems, drawing attention to modern technical achievements in promoting city resilience (green energy use, green roofs, devices for absorption of street air pollutants, etc. [4, 34, etc.]). The natural component of such systems is presented by the blue-green infrastructure which supplies a variety of ecosystem services both increasing the resilience of urban areas and providing better living conditions for citizens.

The studies of green infrastructure within urbanized territories are a primary focus of ecologists and municipal authorities in the majority of the developed countries, especially in the EU. Since 2010, the European green infrastructure became a part of the EU strategy for biodiversity and biodiversity policy. Target 2 of the EU Biodiversity Strategy is directed to maintain and enhance ecosystems and their services by establishing green infrastructure. In 2020, the European Commission established the Urban Greening Platform within the Green City Accord initiative directed “to mobilize European mayors committed to safeguarding the natural environment” [15]. One of the central goals of this initiative was to increase the extent and quality of green areas in cities [8]. Scientific support for these plans nowadays is provided by a large number of institutions, including the international TEEB program studies, urban ecology research programs of the Helmholtz Centre for Environmental Science (Germany), the Ecological Research Network (Ecornet), US Long-Term Ecological Research Network etc., and is also presented in recent monographs [14, 33], etc.

However, modern studies of the urban green infrastructure are still geographically limited and mainly concern the temperate zone cities in Europe and North America. Relevant research for more southern regions is also underway in Brazil, China, and India. As a result, there is an obvious gap in these studies for the Arctic zone where the existence of urban green infrastructure remains “unnoticed” by the scientific community [1, 13, 20]. Meanwhile, several large cities such as Murmansk, Norilsk, Vorkuta and Tromsø with a population of 60000–310000 citizens are located beyond the Polar circle! The functions of green infrastructure promoting sustainable development here have features different from those in the temperate zone. For example, in terms of microclimate regulation ecosystem services, wind protection becomes more important than urban heat mitigation and information/cultural ecosystem services acquire special significance [19]. This idea supports the exclusivity of Arctic cities as they are bases for regional development. Arctic cities have specific public institutions that exist in extreme conditions as well as a specific internal structure and functioning. [25]. The following municipal priorities for strategic sustainable development goals have been recently outlined for Arctic cities: prevention and reduction of pollution, rehabilitation of damaged natural environmental systems, elimination of accumulated ecological damage, and protection of endangered species [16]. These goals may refer to many temperate zone cities as well. An innovative approach to the role of green infrastructure in Arctic cities was demonstrated in Green Arctic Building Project (GRAB) launched by Russia, Sweden, Norway and Finland in 2019–2021¹, which focused on green building as the main topic. Arctic TEEB studies within the CAFF program of the Arctic Council are limited to biodiversity aspects [30]. Major research on green infrastructure in Arctic cities concerns agrotechnical and horticulture practices. Thus, a certain gap in studies devoted to the ecosystem functions of green infrastructure in Arctic cities is evident. The goal of this research is to reveal the main differences in the functions of green infrastructure in the Russian Arctic cities that support their resilience and demonstrate the important role of small city parks (pocket parks and squares) as elements of green infrastructure in this region.

¹ Green Arctic Building. www.site.unit.no



Fig. 1. Study area.

MATERIALS AND METHODS

This study focused on the cities of Murmansk, Kirovsk, and Vorkuta, which are located beyond the Polar Circle in the European part of the Subarctic zone and the Arctic administrative zone of Russia (Fig. 1). The first two cities belong to Murmansk region, while the third is located in the Komi Republic of the Russian Federation. Their modern ecological and geographical characteristics are different, but green infrastructure has many common features typical for the majority of Arctic and Subarctic cities and different from those of more southern cities of the Temperate zone.

Murmansk is situated at the northern limit of the forest-tundra zone, Kirovsk is located at the northern limit of the taiga zone on the Kola peninsula, and Vorkuta is located in the tundra zone at the North-Eastern marginal part of the Russian plain. All the studied cities are characterized by Subarctic climate, but with significant differences in their regional characteristics. In Murmansk region, the climate is Subarctic marine, while in Kirovsk it has many features of the continental climate. The climate in Vorkuta belongs to the Subarctic moderate continental type. Winters are long, but not as harsh as in Siberia, especially in the Murmansk region which is heated by the North Atlantic current. Summers are short and cool. Excessive hydration and snow cover period of more than 6 months are typical, strong winds are often and permafrost is found in Vorkuta. According to the first world classification of the Arctic zone cities [36], the city of Murmansk belongs to the category of key multifunctional centers, while Kirovsk and Vorkuta represent industrial inland centers. Their major socioeconomic and ecological characteristics are shown in Table 1.

All three cities have a well-developed green infrastructure which partly inherits forest and shrub natural remnants and partly was designed and planted over several decades. Thus, it combines initial planning and preservation of “green patches” within cities.

Our methodology was based on a combination of general official information from different regional and Federal sources, along with the analysis of scientific publications and field research data relevant to this study. This complex approach helped to reveal the problem and highlight its regional aspects. We used official data from the Federal Statistics Service, the information from the municipal Internet sites of the model cities, relevant international sites, OpenStreetMap and our field data. The field data included visual landscape studies and selective observations of the attendance to central small squares in summer and winter time, qualitative evaluation of visiting activities in daytime and during city festivals, and age composition of visitors at different times of the year. For Murmansk and Vorkuta, we also analyzed relevant information from local Internet sources, such as the frequency of appearance of popular parks’ photos and sometimes information from selective interviews with citizens. Ranking of the ecosystem services was adopted from our previous studies [10] where their efficiency was evaluat-

Table 1. Principle socioeconomic and ecological characteristics of the model cities

	Characteristics	Murmansk	Kirovsk	Vorkuta
1	Time of city foundation	1916	1929	1936
2	Population (2021)	307723	25655	70551
3	Planning structure	The city stretches along the Kola Fiord, it has a historical center, regular central urban planning structure and scattered new neighborhoods on the surrounding hills	The city is located on one side of the terraces of the mountain lake Big Vyd'yavr. The city has limited space for the development. It preserves regular compact structure	The city has a regular, compact and elongated character (from north to southwest)
4	Economic activities	Transport and manufacturing industry	Apatite ores mining and initial processing, tourism	Coal mining
5	Main ecological problems	Air pollution	Air pollution and mechanical disruptions	Mechanical disruptions
6	Green infrastructure, %	30.7	42	14.1*
7	Dominating types of green infrastructure	Forest parks, public parks, pocket parks, street greening	Forest park, pocket parks, street greening	Forest parks, pocket parks

* For the municipal district.

ed based on field studies which revealed their influence on erosion, microclimate, recreation resources, etc. The principal research methods were landscape ecological and system analysis supplemented by the study of cultural landscapes. Cultural landscapes were defined as social-ecological systems in which both parts were equally important for the resilience effect studies [18].

RESULTS AND DISCUSSION

Social-ecological systems of Arctic cities

Arctic cities represent complicated social-ecological systems with many specific features in their composition [2, 17, 19, 26]. Dense urban development connected with difficulties in green infrastructure construction and maintenance, patterns of green infrastructure development, pools of ecosystem services that provide resilience, and specific images of cultural landscapes present key points to consider in city planning practice to provide the resilience of social-ecological systems to modern socio-economic and climatic changes [28, 20, etc.]. Green infrastructure is one of the most important elements of this resilience and its studies in Arctic cities are still new and rare [11, 13, 23]. Most often they only concern planning and climate change aspects, but not system analysis of green infrastructure functions that support resilience.

Specific features of green infrastructure in Arctic cities.

Green infrastructure in the majority of Arctic cities consists of relatively large park zones, small city parks, and street greening, often supplemented by small lakes and rivers with riparian territories. Large park zones in the model cities are represented by the patches of natural forests or shrubs in the form of city parks (with lighting, alleys, etc.), such as Kirovsk central park, Dolina Ujuta ("The valley of comfort") and Ogni Murmanska ("Lights of Murmansk") in Murmansk, Central and Pioneer parks in Vorkuta (former bogged shrubs), etc. Long snow cover and Polar night periods, extreme meteorological events during the cold period which lasts for more than half a year (strong winds and frosts, heavy snowfalls), remoteness from the central residential areas, and difficulties in clearing paths from snow limit the attendance of these parks mainly to weekends.



Fig. 2. Small city parks: central squares in Kirovsk (1); Vorkuta (2); Murmansk (3).

Alongside such large elements of green infrastructure, there are also small city parks in the model cities: 11 in Kirovsk, about 22 in Murmansk, and 3 in Vorkuta (Fig. 2). They occupy not more than 2 ha, but usually are much smaller. They may also be represented just by small patches of secondary vegetation (birch, willow, shrubs) remaining within city blocks. Another type of small parks is specially designed spaces decorated by trees, shrubberies, flowerbeds, and lawns. They are popular among citizens of different ages as places for rest, socializing and contact with nature.

Small parks are situated close to residential areas. During winter time paths and benches are regularly cleared from snow making these spaces reachable for citizens. In summer time parks are attractive because of flowering herbaceous plants and shrubs (*Syringa josikaea*, *Spiraea* sp., *Lonicera* sp., *Primula* sp., *Aconitum* sp., *Potentilla* sp., *Viola tricolor*, etc.) that are well-adapted to local conditions. The recommended types of ornamental plants include trees, shrubs, perennial, annual and biennial flower plant species. Tree species are mostly local and include birch (*Betula pubescens*), willow (*Salix* sp.), mountain ash (*Sorbus gorodkovii*), aspen (*Populus tremula*), larch (*Larix sibirica*), etc. These features of small urban parks to some extent provide the citizens with everyday contact with nature [22] and break the monochromic image that creates visual discomfort for citizens, especially during a long winter.

Priority ecosystem services of small city parks.

Pools of ecosystem services reflect the contribution of the social-ecological system to sustainable development [6]. There is no doubt that green infrastructure in Subarctic cities provides the traditional spectrum of ecosystem services, which includes regulating, supporting, information and even productive (berries and mushrooms in large parks attract people) services. At the first glance, they may not differ from those of the more southern regions, but this

Table 2. Prioritization of ecosystem services of green infrastructure in Murmansk, Kirovsk, Vorkuta

	Ecosystem service	Structure	Murmansk	Kirovsk	Vorkuta
			Importance (rank)*		
1.	Regulating	Runoff regulation	2	2	3
		Wind cooling protection/microclimate regulation	2	3	2
		Polluted air and runoff purification	1	1	1
		Noise mitigation	2	2	2
		Permafrost stabilization	—	—	3
2.	Supporting	Biodiversity support	2	2	2
3.	Productive	Berries, mushrooms, etc. production	1	3	1
4.	Information	Chromatic (different colors), aesthetic resources	3	3	3
		Recreation resources	3	3	3
		Spiritual (social cohesion)	3	3	3

* 1—the highest, 3—the lowest.

is only partly true. We argue that there may be certain differences important for the well-being of citizens and green infrastructure management practice. In our previous study [10] we revealed that the weight (importance) of principal regional ecosystem services for environment stabilization and city resilience in Murmansk and Tromsø Subarctic cities were different and depended on different combinations of natural and socioeconomic factors. We extended this ranking based on a system analysis of our field data for the study area which included the analysis of ecological factors, a sociological survey and a review of relevant Internet publications. This data processing allowed us to develop a qualitative (expert) ranking of ecosystem services for the studied cities (Table 2).

The ranking revealed the higher importance of information ecosystem services supplied by local green infrastructure. It becomes even more evident for small city parks which reflect the specific nature of connection within the city area, especially in winters, thus creating images of Arctic cities [35]. Very often small city parks become iconic communication places in the cultural landscapes of Arctic cities. The most vivid example is “The Five Corners”, a small city park in the center of Murmansk (Fig. 2). It is situated at the crossroad of 5 main streets, close to the Central Palace of Culture, the biggest hotel, and the railway terminal. Its name reminds of the close connections between Murmansk and Leningrad (currently St. Petersburg) during the city’s construction period as the same toponym also exists in St. Petersburg. This place is used for city festivals, it is carefully managed and became one of the city’s symbols. It attracts both citizens and tourists visiting Murmansk all over the year. Creating a sense of place is one of the most important functions of small urban parks contributing to city resilience [3, 21, 31].

System approach to green infrastructure studies in the urban resilience context.

City resilience explains the long-term ability of a social-ecological system to cope with social, climatic etc. changes and to continue its development. A resilience discourse incorporates two important directions: socioeconomic and ecological which depend on different factors that in some cases produce a joint effect (Fig. 3).

The important socioeconomic factors for green infrastructure include its size, geographical location, city economy and management practice, local cultural traditions and social cohesion. A combination of ecological and socioeconomic factors implemented into nature-based solutions in management practice result in livable cities [8]. Small parks in Arctic cities provide community-level resilience. For example, a small city park in Kirovsk center (Fig. 2) exists for

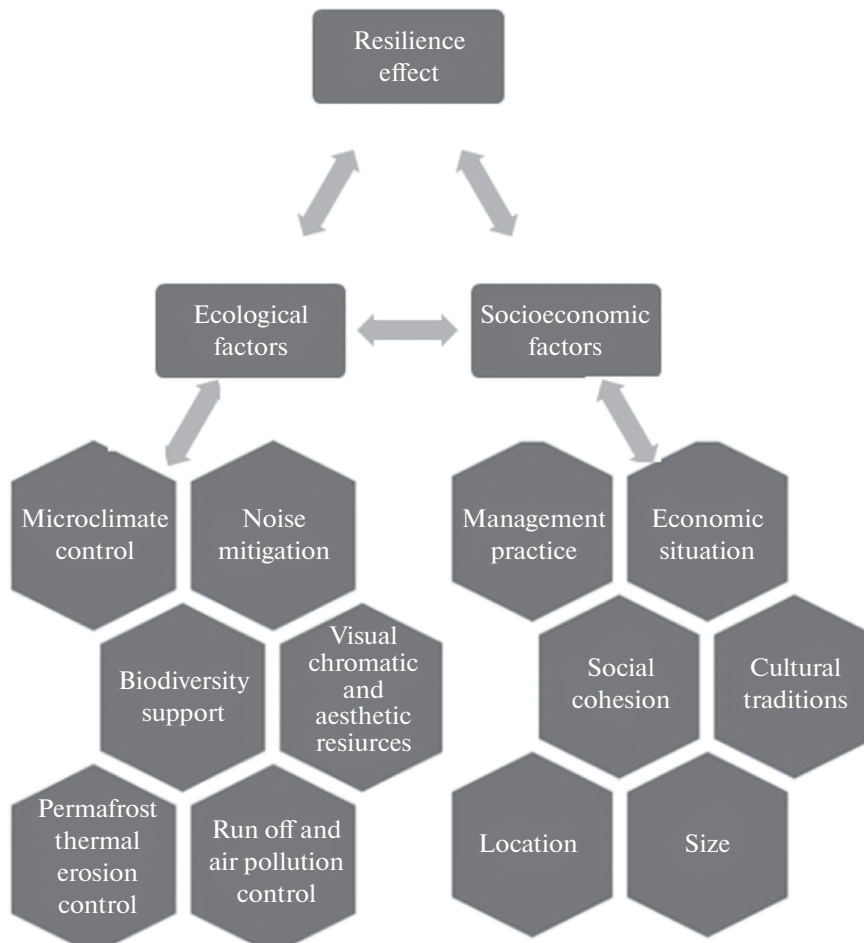


Fig. 3. The Joint effect of ecological and socioeconomic factors in city resilience.

about 7 decades and becomes more and more maintained thus demonstrating its role in supplying specific ecosystem services of primary importance for citizens (Table 2). Industrial economic development and high anthropogenic pollution along with harsh climate and need for manpower launched green infrastructure development in Arctic cities to improve living conditions and create an attractive image of industrial cities. Small parks in historical centers of such cities became favorite places for citizens. At the same time, ensuring social stability in the conditions of high migration activity generates a need for social cohesion which is stimulated by comfortable communication in small city parks as well as during popular volunteer activities for their maintenance. Decorative plants (demanding frequent refreshing because of climatic conditions), snow removal, benches, and lighting make comfortable places for communication and reflect a cultural tradition of establishing attractive small parks in northern industrial cities to bridge the gap for everyday communication with nature, which is especially important for citizens in local conditions. The example of Kirovsk demonstrates close links between the mentioned factors. At the same time, small parks being an element of green infrastructure provide ecological resilience common for green infrastructure in general (Table 2), including

noise mitigation, wind and air pollution protection, biodiversity support, runoff control, etc. (Fig. 3).

Practical approach

The achievement of resilience in Arctic cities related to small parks is based on the consideration of the joint effect of the mentioned above factors, supplemented by appropriate technologies and actions [34]. Practical actions for supporting relevant ecosystem services were outlined in TEEB Manual for cities [29]. The goal of the TEEB-Urban project was to make a tool to integrate ecosystem benefits in the management process, including financing for municipalities. But as it was mentioned earlier relevant ecosystem services are geographically specific. Because of this, different practices and activities were suggested for “northern” regions [13, 17, 22, 23, etc.]. Most often regulatory services such as air pollution, runoff control and noise mitigation and recreation ecosystem services were mentioned as key points for management financing. This is true for the small Arctic city parks as well. For the biodiversity and aesthetic value support, there is no existing research, though such practice is known for more southern latitudes [5, 14, etc.], while the spiritual ecosystem service is still unquantifiable and is not discussed. The joint analysis of ecological and socioeconomic factors however suggests that it is relevant to the majority of ecological ecosystem services (the so-called indirect evaluation).

Appropriate technologies for the model cities were developed for many decades by the Polar Arctic Botanical Garden (institute) of the Kola Scientific Center and Biological and Agrobiotechnological institutes of the Ural Scientific center of the Russian Academy of Sciences. They may be referred to as nature-based solutions by ecosystem-based adaptation valuable for management practice [8, 24].

Small city parks are often used by municipal authorities as a place to demonstrate achievements in municipal development, exhibit paintings of local artists (in summer), and hold different festivals.

The development and improvement of green infrastructure were included in municipal development plans of the model cities adopted for 2017–2030. However, planning activities there concern mainly large city parks and generally lack a joint approach to address socioeconomic and environmental aspects of sustainable development. Nevertheless, citizens participate in this process by discussing acute problems of small city parks with local municipal authorities using different Internet platforms and mass media. Relevant ecological volunteer activities are popular among citizens of all ages as well, especially in the groups of older people and school children.

Conclusion

Small urban parks nowadays are mainly regarded as recreational territories, even though they provide “social production”, which creates a certain balance between social and natural systems and supports resilience. The research highlighted the role of small city parks in promoting the resilience of cities in the Arctic region. Special attention was given to their specific regional ecosystem functions.

- Adequate management of urban green infrastructure nowadays is an essential part of implementing nature-based solutions, but the existing practice is still limited geographically. The management of small urban parks in Arctic cities based on the studies of their ecosystem services plays an important role in achieving city resilience in uncomfortable living conditions.

- The functions of ecosystem services in Arctic cities differ from those in more southern latitudes. Information ecosystems services (chromatic, aesthetic) become particularly important as they help to improve the quality of life in the conditions of harsh climate accompanied by local ecological problems. Nowadays, partial monetary assessment of these services can be done in order to consider them in the city management plans. Their effective management

patterns for the model Arctic cities were developed by regional scientific and practical institutions.

- For the spiritual ecosystem services of small city parks, there is currently no method of monetary assessment. However, further studies are needed because they provide a platform for developing social cohesion and creating a sense of place. This function helps to prevent many negative social processes typical for industrial Arctic cities, such as increased migration, indifference of new settlers to municipal development problems, etc.

- Modern nature-based solutions in Arctic cities are mainly directed at regulating ecosystem services of urban green infrastructure presented by large park territories. These solutions are typical for other geographical zones as well. Small urban parks contribute to the resilience of urban social-ecological systems by providing specific spiritual ecosystem services. Some of them form links with the past historical events associated with the economic development of the Arctic, generating a sense of pride. Besides, they provide new settlers with the enjoyment of close contact with small patches of nature that resemble their native places in more southern regions. Spiritual ecosystem services are especially important for the model Arctic cities and require careful maintenance.

Green infrastructure management in small city parks of the Arctic region requires special attention from municipal authorities because they produce a valuable social footprint. They promote the inclusive social development of Arctic cities, which is important for the resilience of the social-ecological system. Very often they create the image of Arctic cities. Scientific support for this process needs further investigation, especially this concerns large-scale studies of small city parks under different environmental conditions.

REFERENCES

1. Arctic Human Development Report: Regional Processes and Global Linkages // TemaNord. 2014. № 507. P. 1–503.
<https://doi.org/10.6027/TN2014-567>
2. Baburin V.L., Goryachko M.D., Zemzov S.P. et al. Natural factors of urbanized spaces development in the Arctic zone of Russia // *Voprosy Geografii*. 2016. Vol. 142: Geography of Polar regions. P. 47–56. URL: <http://www.elib.rgo.ru> [Assessed 15.12.2020] (In Russian with English summary).
3. Barreteau O., Ricci F. Sense of place in socio-ecological dynamics // *The Third International Science and Policy Conference on the resilience of social & ecological systems*. 2014. Montpellier Abstract 23954. URL: <http://www.resilience2014.org> [Assessed 15.01.2021].
4. Benedict V., McMahon E. Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century // *Renewable Resources Journal*. 2002. Vol. 20. № 3. P. 12–17.
5. Bitterman N., Simonov E. Multisensory design of pocket gardens for reducing stress and improving well-being, performance and satisfaction // *The Design Journal*. 2017. № 20. P. 2418–2425.
<https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352755>
6. Bousquet F., A. Botta, L. Alinovi O. et al. Resilience and development: mobilizing for transformation // *Ecology and Society*. 2016. Vol. 21. № 3. Art. 40.
<https://doi.org/10.5751/ES-08754-210340>
7. De Groot R., Brander L., Solomonides S. Update of global ecosystem service valuation database (ES-VD). FSD report № 2020-06. Wageningen, The Netherlands. 2020. 58 pp.
8. Dushkova D., Haase D. Not Simply Green: Nature-Based Solutions as a Concept and Practical Approach for Sustainability Studies and Planning Agendas in Cities // *Land*. 2020. Vol. 9. № 1. P. 1–37.
<https://doi.org/10.3390/land9010019>
9. Ecosystem Services of Russia: Prototype of the National Report. Services of Terrestrial Ecosystems. Moscow: Biodiversity Conservation Center Publishers, 2016. 148 pp.
10. Evseev A., Krasovskaya T. Prioritization of green infrastructure ecosystem services for Subarctic cities: Landscape Science and Landscape Ecology: Considering Responses to Global Challenges. IALE-Russia International Online Conference, Book of Abstracts. 2020. Moscow. Abstract. 200. URL: <http://www.iale.conflab.ru> [Assessed 25.10.2020].
11. Esau I., Miles V. Warmer urban climates for development of green spaces in northern Siberian cities // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. Vol. 9. P. 48–62.
12. Fedorov B.G. Russian carbon balance. Moscow: Nauchny consultant, 2017. 82 pp. (In Russian).
13. Fedorov R., Kuklina V., Sizov O. et al. Zooming in on Arctic urban nature: green and blue space in Nadym, Siberia // *Environment Res. Lett.* 2021. Vol. 16. № 7. 5009,
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0fa3>

14. *Geneletti D., Cortinovis C., Zardo L., Esmail B.A.* Reviewing Ecosystem Services in Urban Plans. Planning for Ecosystem Services in Cities. Springer Briefs in Environmental Science. 2020. Cham: Springer, 86 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-20024-4>
15. Green City Accord Brochure. Publication office EU, 2020. P. 1–6.
<https://doi.org/10.2779/476324>
16. Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic. (Ed. Vasilii Erokhin, Tianming Gao and Xiuhua Zhang). Chicago: IGI Global, 2019. P. 495–513.
<https://doi.org/10.4018/978-1-5225-6954-1.ch023>
17. *Hansen K., Rasmussen R., Weber R.* Nordgeo working paper No 6: Proc. of the First International Conference on Urbanization. Arctic Conference. Ilmimarfik, Nuuk, Greenland. 2013. 212 p. URL: <http://www.norden.org> [Assessed 12.01.2020].
18. *Kaluzkov V.N.* Landscapes in cultural geography studies//Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series, 2008. № 4. P. 11–19. URL: izvestia.igras.ru/jour/article/view/394 [Assessed: 20.12.2020] (In Russian with English summary).
19. *Komarchev D., Krasovskaya T.* Comparative characteristics of ecosystem services of the urban green infrastructure in the Temperate and Subarctic zones: Proc.of the IX. scientific-practical conference Ecological problems: A Look into the Future. Rostov-na- Donu, 2020. P. 351–356. (In Russian with English summary).
20. *Maudsley A.* North of the Arctic Circle: Ralph Erskine’s Mid-20th Century Urban Planning and Design Projects in Kiruna and Svappavaara. Urban Resilience in a Global Context. Bielefeld: Verlag, 2020. P. 57–76.
<https://doi.org/10.14361/9783839450185-004>
21. *Nordh H., Østb K.* Pocket parks for people – A study of park design and use//Urban Forestry & Urban Greening, 2013. Vol. 12. № 1. P. 12–17.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.11.003>
22. *McHale M., Pickett S., Barbosa O. et al.* The New Global Urban Realm: Complex, Connected, Diffuse, and Diverse Social-Ecological Systems // Sustainability, 2015. Vol. 7. № 5. P. 5211–5240.
<https://doi.org/10.3390/su7055211>
23. *Orttung R., Laruelle M.* (Ed.) Urban Sustainability in the Arctic: Visions, Contexts, and Challenges. Washington, DC: The George Washington University Press, 2017. 496 pp. URL: <http://www.academia.edu> [Assessed 12.09.2020].
24. *Pan H., Page J., Cong C., Barthel S., Kalantari Z.* How ecosystems services drive urban growth: Integrating nature-based solutions// Anthropocene, 2021. Vol. 35. 100297.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021>
25. *Pilyasov A.N.* Cities-bases of the Arctic Frontier // Geography issues, 2016. № 141. P. 503–529. (In Russian with English summary).
<https://doi.org/10.15372/REG20150901>
26. *Pilyasov A., Putilova E.* Challenging the obvious: Arctic cities // Urban studies and practices, 2020. Vol. 5. № 1. P. 9–32. (In Russian with English summary).
<https://doi.org/10.17323/usp5120209-32>
27. Quito Declaration on Sustainable Cities and Human Settlements for All. The UN New City Agenda, 2016. URL: <http://www.habitat3.org> [Assessed 15.02.2021].
28. *Sellberg M., Wilkinson C, Peterson G.* Resilience assessment: A useful approach to navigate urban sustainability challenges // Ecology and Society, 2015. Vol. 20. № 1. 43.
<https://doi.org/10.5751/ES-07258-200143>
29. TEEB manual for cities: ecosystem services in urban management. 2011. P. 1–48. Available at: <http://www.teeb.org> [Assessed 15.04.2020].
30. The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) for the Arctic: A Scoping Study: CAFF Assessment Series Report 12. Akureyri, Iceland, September 2015. 168 pp.
31. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Switzerland: Springer Nature, 2017. 742.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>
32. *Tikhonova T.V.* Ecosystem services: ways of their practical application//Problems of territory’s development. 2019. № 1 (990. P. 25–39.
<https://doi.org/10.15838/ptd.2019/1/99.2>
33. Urban Resilience in a Global Context. Actors, Narratives, and Temporalities. Bielefeld: Verlag, 2020. 217.
<https://doi.org/10.14361/9783839450185>
34. *Zaykova E.* Nature Restoration Technologies as a Tool for Urbanization Management: E3S Web of Conferences 263, 2021. 05037.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126305037>
35. *Zamyatin D.N.* Post-Urbanism and Cold: Geo-cultural images and representations of cultural landscapes of Northern and Arctic cities // Bulletin of Archeology, Anthropology and Ethnogra-

- phy, 2020. Vol. 4. № 51. P. 218–227. (In Russian with English summary).
<https://doi.org/10.20874/2071-0437-2020-51-4-19>
36. Zamyatina N., Goncharov R. Arctic urbanization: phenomenon and comparative analysis // Bulletin of the Moscow University (Ser.5: Geography), 2020. № 4. P. 69–82. Available URL: <http://www.vestnik5.geogr.msu.ru> [Assessed 5.04.2021] (In Russian with English).

Small urban Parks in the Russian Arctic Cities: Priority Ecosystem Functions and Services Promoting City Resilience

A. V. Evseev¹, * and T. M. Krasovskaya², **

¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 199991 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 199991 Russia

*E-mail: avevseev@yandex.ru

**E-mail: krasovskt@yandex.ru

Abstract—The research highlighted the role of small city parks (pocket parks, squares) in promoting the resilience of cities in the Arctic region of Russia. The model cities were Murmansk, Kirovsk, and Vorkuta situated in the European North of Russia. Their modern ecological and geographical characteristics are different, but their green infrastructure has many common features typical to the majority of Arctic cities. Special attention was given to specific regional ecosystem functions of green infrastructure, which are different from more southern regions. Studies of these functions are needed to develop nature-based solutions for providing urban population well-being and biodiversity support, effective management of urban green infrastructure, and ensuring the resilience of social-ecological systems. This is proven by the existing practice which is still limited geographically and mainly concerns large parks. The goal of this research was to demonstrate specific regional ecosystem functions of small city parks, which are different from the ones of large parks in this region. Small urban parks nowadays are mainly regarded as recreational territories, even though they can contribute to creating an important balance between social and natural systems and support the social branch of urban resilience in uncomfortable living conditions. Their ecosystem services differ from those in more southern latitudes. Information ecosystems services (chromatic, aesthetic) are particularly important. They provide a platform for developing social cohesion and creating a sense of place, which allows to withstand negative social processes typical for many cities in the Russian Arctic. Further studies are needed for spiritual ecosystem services as well as for possible ways of monetary assessment of information/cultural ecosystem services. Green infrastructure management of small city parks in the Arctic region requires special attention from municipal authorities.

Keywords: Russian Arctic, urban green infrastructure, ecosystem functions, resilience, social cohesion

Acknowledgements. We thank Dr. O. Kotova and A. Kalmykov for their help in preparing the photos.

ОЦЕНКА ЭСТЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАВНИННЫХ ЛАНДШАФТОВ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ (НА ПРИМЕРЕ МУЗЕЯ-ЗАПОВЕДНИКА “КУЛИКОВО ПОЛЕ”)

© 2022 г. Н. Н. Калущкова^а *, Э. А. Лозбенева^а **

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: kalutskova@gmail.com

**E-mail: elina7-sheremet@mail.ru

Поступила в редакцию 04.05.2022 г.

После доработки 01.11.2022 г.

Принята к публикации 17.11.2022 г.

Эстетические свойства ландшафтов традиционно определяются на основе системы визуальных показателей в ходе полевых обследований по отдельным маршрутам. Возможность применения дистанционных методов в таких исследованиях зависит от согласия их результатов с полевыми данными. В статье сравниваются результаты эстетической оценки ландшафтов музея-заповедника “Куликово поле” на основе традиционных полевых методов и снимков высокого разрешения, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Исследование было проведено в мае 2021 года для экологической тропы музея протяженностью около 6 км, на которой маркированы обзорные точки с открывающимися панорамными видами, характерными для ландшафта холмисто-увалистых структурно-денудационных равнин. На примере трех показателей – глубина и разнообразие перспектив, лесистость и обилие открытых пространств в пейзаже – демонстрируется, что метод эстетической оценки ландшафтов на основе комбинированных данных ДТМ (разрешение 2 м) и SRTM DEM (разрешение 30 м) позволяет определить эти визуальные показатели с хорошим совпадением с полевыми результатами. В отдельных случаях требуется введение поправок на визуальное искажение, связанное с удаленностью наблюдаемых объектов. Показано, что методика эстетической оценки ландшафтов с применением ГИС-технологий, которая ранее проводилась для горных территорий, может быть использована для менее выразительных по рельефу и антропогенно освоенных равнинных ландшафтов.

Ключевые слова: эстетика ландшафта, музей-заповедник “Куликово поле”, экологическая тропа, эстетическая привлекательность, эстетические свойства ландшафтов, зона видимости

DOI: 10.31857/S0869607122050056

ВВЕДЕНИЕ

Оценка эстетических свойств ландшафтов определяется совокупностью его визуальных качеств. Традиционно эстетическая оценка проводится в ходе полевых обследований с использованием балльной системы оценки тех элементов ландшафта, которые определяют эстетическую ценность характерных для него пейзажей [2, 6, 8, 11, 12, 15, 18]. Главное достижение первых полевых исследований заключалось в демонстрации того, что субъективность оценки эстетического качества территории может быть

элиминирована за счет разложения восприятия на все более элементарные составляющие.

Во многих подобных работах соотношение понятий “пейзажа”, т.е. то, что поддается непосредственному восприятию наблюдателя в некоей точке на территории, и самой территории, к которой относится пейзаж, не было прояснено. В самых первых “пейзажных” работах российских географов (А.П. Нечаев, А.А. Борзов, В.П. Семенов-Тянь-Шанский), подразумевалось, что научному исследованию подлежит не всякий пейзаж, а наиболее характерный для данного типа ландшафта (моренный, речной и т.д.) [20]. Делая это различие, географы пытались преодолеть устойчивую коннотацию термина “пейзаж” с сугубо индивидуалистским субъективным восприятием пространства. Согласно В.А. Николаеву, ландшафт также представляет собой территорию, обладающую своими эстетическими качествами, т.е. разные типы ландшафтов характеризуются разными эстетическими свойствами [13]. В данной работе мы придерживаемся традиционной точки зрения: каждый ландшафт может быть представлен типичными для него пейзажами, которые описываются совокупностью элементарных визуальных параметров. Пейзаж в таком понимании поддается научному толкованию, что важно для усиления образовательной составляющей в экологическом туризме.

В последнее время широкое распространение в исследовании визуальных качеств ландшафтов получили данные высокого пространственного разрешения, полученные в процессе обработки аэрофотоснимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [19, 21–23]. Внедрение этих методов позволяет проводить обработку массивного объема пространственных данных с использованием ГИС, что открывает широкие возможности в визуализации пространственных данных для наглядного отображения полученных результатов в целом [1, 4, 5, 7, 9, 14]. Принципиальным элементом исследования является валидация дистанционных данных с результатами полевых обследований.

В данной работе рассмотрены результаты оценки отдельных эстетических свойств ландшафтов музея-заповедника “Куликово поле” как традиционным полевым методом, так и автоматизированными методами ГИС-анализа. Равнинные территории не часто служат объектом пейзажных исследований в силу их меньшей выразительности и большей антропогенной освоенности по сравнению с горными территориями. На территории заповедника имеется экологическая тропа “Часовня—Конный Двор—Музей” протяженностью около 6 км, на которой маркированы обзорные точки с открывающимися панорамными видами, характерными для ландшафта холмисто-увалистых структурно-денудационных равнин (рис. 1). В ходе полевого обследования обзорные точки оценивались по своим визуальным качествам по методике К.И. Эрингиса и А.Р. Будрюнаса в отношении 3 параметров: глубина и разнообразие перспектив, общая лесистость пейзажа и обилие открытых пространств в пейзаже [18]. Данные полевой оценки сопоставлялись с результатами съемки местности с помощью БПЛА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании были задействованы следующие данные:

1. Данные полевых исследований: GPS-трек вдоль экологической тропы, точные координаты обзорных точек, результаты оценки эстетических показателей с обзорных точек.
2. Пространственные данные аэрофотосъемки с высоты 150 м с использованием БПЛА DJI Mavic Pro: плотное облако точек, ортофотоплан и цифровая модель местности DTM (разрешение 2 м).
3. Цифровая модель рельефа SRTM DEM (разрешение 30 м).
4. Космические снимки со спутника Landsat-8 OLI (разрешение 30 м).

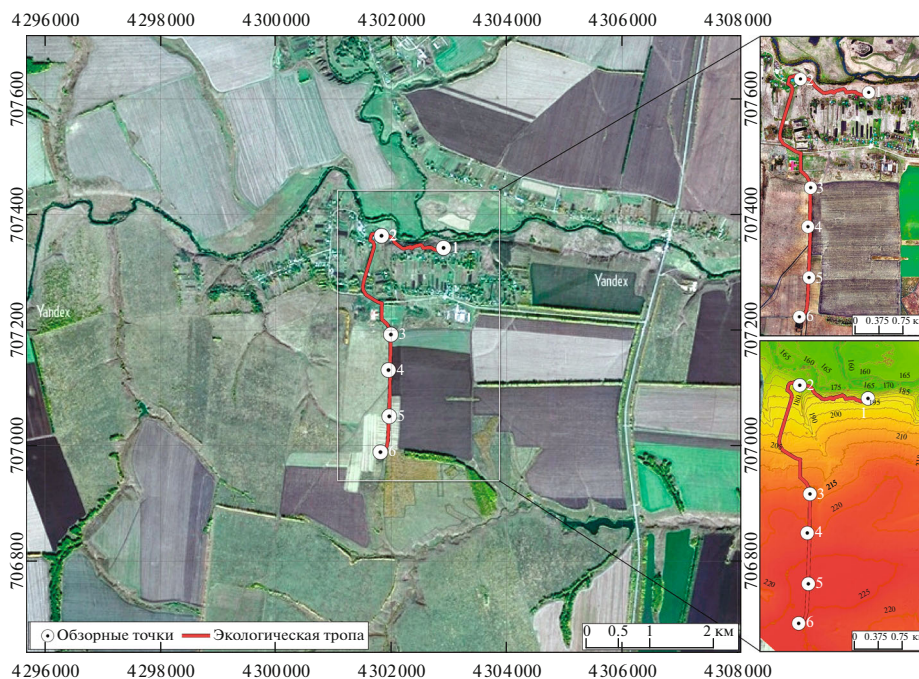


Рис. 1. Экологическая тропа на территории природного музея-заповедника “Куликово поле”: сверху – детальный ортофотоплан, снизу – ЦММ на основе данных аэрофотосъемки с БПЛА.

Fig. 1. Ecological trail on the territory of the Nature Museum-Reserve “Kulikovo pole”: from above—detailed orthophotomap, from below—DTM based on aerial photography from a UAV.

5. Ландшафтная карта на территорию музея-заповедника “Куликово поле” (масштаб 1 : 50 000).

Для предварительной обработки аэрофотоснимков с БПЛА и создания цифровой модели использовалось программное обеспечение Agisoft Metashape. Анализ основного массива пространственных данных проводился в программе ArcMap 10.3. В статье представлена оценка общей зоны видимости со всех обзорных точек. В качестве примеров детально представлены показатели – “Глубина и разнообразие перспектив”, “Общая лесистость пейзажа” и “Обилие открытых пространств в пейзаже”.

Функциональный алгоритм построения зоны видимости с каждой обзорной точки и оценки одного из предлагаемых показателей “Глубины и разнообразия перспектив” представлен следующей последовательностью операций (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Построение зон видимости. На основе данных аэрофотосъемки с БПЛА был построен ортофотоплан и цифровая модель местности (DTM/Digital Terrain Model) с разрешением 1 м, охватывающие территорию, по которой проходит экологическая тропа. Эти данные обеспечили высокую точность открывающихся зон видимости в ближней и средней перспективе. Совместив полученную DTM с данными радарной топографической съемки SRTM DEM была построена базовая модель, которая обеспечила охват территории вплоть до линии горизонта в радиусе 15–16 км от тропы.

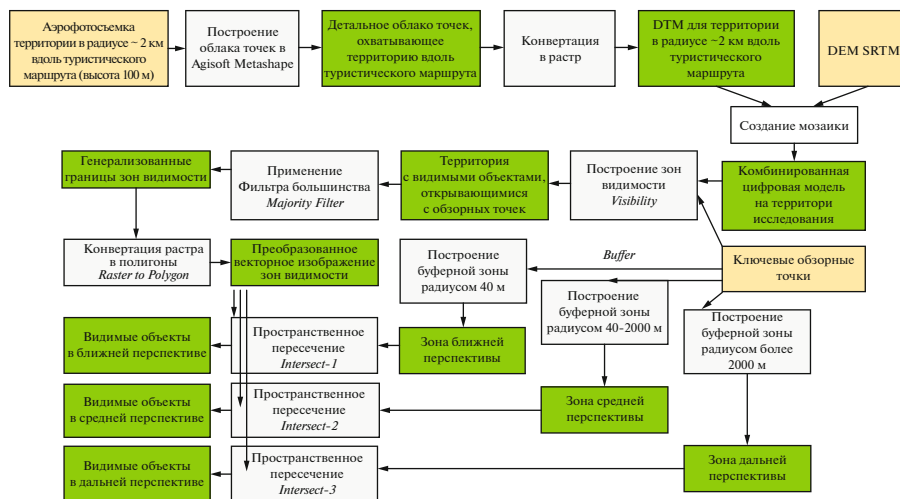


Рис. 2. Пример функционального алгоритма для построения зон видимости и оценки показателя “Глубины и разнообразия перспектив” в ArcGIS 10.3.

Fig. 2. An example of a functional algorithm for constructing visibility zones and evaluating the “Depth and Diversity of Perspectives” indicator in ArcGIS 10.3.

Комбинированная DTM была взята за основу оценки визуального восприятия территории с учетом высоты форм рельефа. Построение зон видимости осуществлялось с помощью группы инструментов *Visibility*, которые позволили определить участки территории, открывающиеся с обзорных точек. Совмещение полученных результатов со всех обзорных точек позволило создать общую панораму видимости для экологической тропы целиком (рис. 3).

Ландшафтные комплексы “Куликово поля” в зоне видимости экологической тропы. Проецируя зоны видимости со всех обзорных точек на ландшафтную карту “Куликово поля”, мы оценили репрезентативность экологической тропы в отношении природной структуры территории музея-заповедника (рис. 4).

В левобережном ландшафте структурно-денудационных волнисто-увалистых равнин хорошо просматриваются практически все урочища приречного ландшафтного уровня, а именно хорошо дренированные уплощенные плакоры (5) придолинных покатости (6), увалистые поверхности II надпойменной террасы (7). Наличие широких плоских плакорных поверхностей является отличительной особенностью всей территории Куликова поля [3]. В балочных формах, выделяются только склоны, из-за значительной расчлененности днища балок не просматриваются. Поверхности же междуречного уровня просматриваются гораздо слабее.

Зона видимости в пределах ландшафта полого-увалистых структурно-денудационных равнин (междуречье рр. Дона и Непрядвы) в общих чертах повторяет зону видимости предыдущего ландшафта. Здесь также хорошо просматривается приречный ландшафтный уровень, который охватывает урочища дренированных придолинных покатостей (17) и покато-увалистых поверхностей II надпойменной террасы (18). Урочища междуречий (14) просматриваются фрагментарно.

С обзорных точек отлично видна пространственная структура левобережной части ландшафта террасированных речных долин Дона и Непрядвы. Очень хорошо просматриваются поверхности I надпойменной террасы, высокой, средней и низкой пойм. На низкой пойме видны даже старицы и западины.

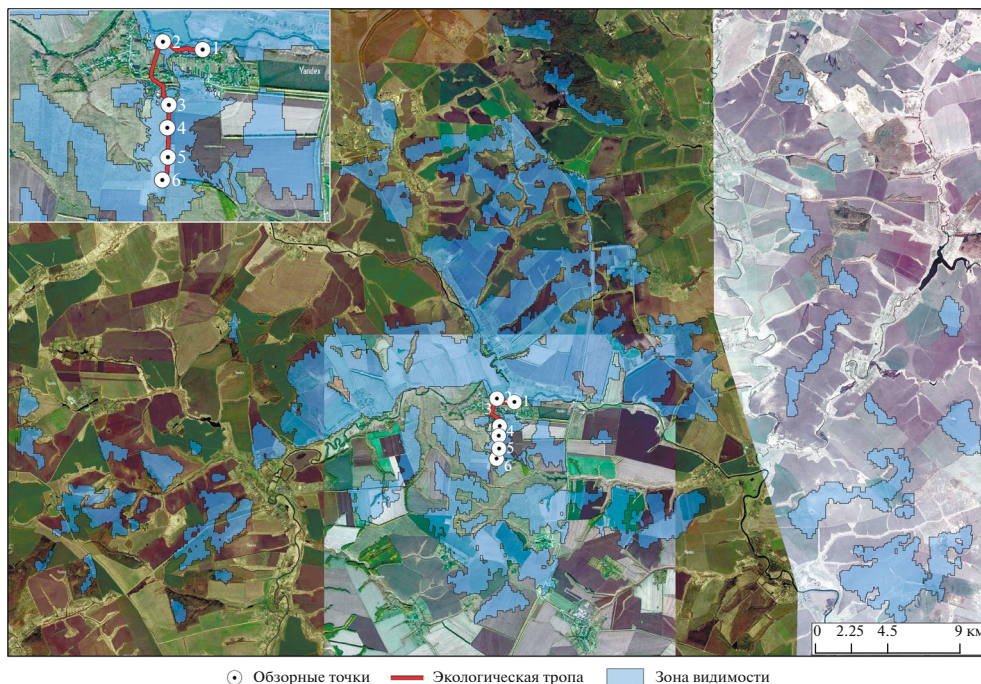


Рис. 3. Зона видимости с обзорных точек в пределах экологической тропы, полученная с использованием ГИС-анализа.

Fig. 3. Visibility zone from observation points within the ecological trail, obtained using GIS analysis.

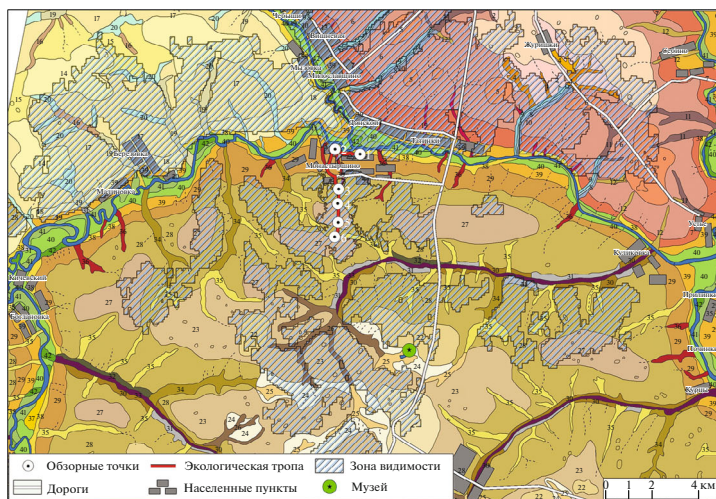
В зону видимости ландшафта полого-увалистых структурно-денудационных равнин (правобережье Непрядвы и Дона) попадают как урочища междуречий (23), так и урочища приречного ландшафтного уровня – слабовыпуклые плакоры (27) и придолинные покатости (28). Поверхности II надпойменной террасы, а также балочные формы в зону видимости не попадают.

Таким образом, в зону видимости экологической тропы попадает большинство типичных урочищ 4-х ландшафтов “Куликова поля”, что повышает научно-образовательную значимость данного маршрута.

Валидация результатов дистанционной съемки экологической тропы. Сравнение результатов полевой оценки эстетических свойств ландшафтов и результатов, полученных при использовании высокдетальных снимков и ГИС-анализа мы провели на примере трех показателей: глубина и разнообразие перспектив, общая лесистость пейзажа и обилие открытых пространств в пейзаже.

На примере двух контрастных точек – №№ 1 и 6 – проиллюстрируем процесс валидации результатов дистанционной съемки экологической тропы. Обзорная точка № 1 находится на пологонаклонной поверхности I надпойменной террасы (высота 162 м н.у.м.), обзорная точка № 6 расположена на слабопокатой междуречной поверхности (высота 208 м н.у.м.). Показатели оценивались по балльной системе согласно методике [18].

Глубина и разнообразие перспектив. Для определения средней и дальней перспектив была создана серия буферных зон вокруг обзорных точек. Средняя перспектива определялась от 40 до 2000 м, дальняя перспектива – от 2000 м до линии горизонта. При



А - Ландшафт волнисто-увалистых, структурно-денудационных равнин, сложенных покровными лёссовидными суглинками с комплексом серых лесных почв под широколиственными лесами, преимущественно сведенными

I - Междуречный ландшафтный уровень

- | | | | |
|---|---|---|-------------------------------------|
| 1 | Плоские междуречные поверхности слабодренированные с многочисленными суффозионными западинами | 4 | Короткие ложбины с четкими бровками |
| 2 | Прилощинные склоны слабодренированные | | |
| 3 | Лощины с широкими нечетко выраженными днищами | | |

II - Приречный ландшафтный уровень

- | | | | |
|---|---|---|---|
| 5 | Уплогненные плакоры относительно хорошо дренированные | 7 | Увалистые поверхности II надпойменной террасы |
| 6 | Придолинные покатоности хорошо дренированные | | |

III - Балочный ландшафтный уровень

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 8 | Задернованные склоны сложных балок | 11 | Средние балки с нерасчленным комплексом склонов и днищ |
| 9 | Эрозионо-расчленные склоны сложных балок | 12 | Мелкие балки с нерасчленным комплексом склонов и днищ |
| 10 | Балочные поймы | 13 | Эрозионные рытвины |

Б - Ландшафт полого-увалистых структурно-денудационных равнин, сложенных покровными лёссовидными суглинками, с комплексом серых лесных почв и чернозёмов под широколиственными лесами и злаково-разнотравными степями, преимущественно распаханными

IV - Междуречный ландшафтный уровень

- | | | | |
|----|--|----|----------------------------|
| 14 | Слабовыпуклые плакоры относительно хорошо дренированные | 16 | Ложбины с четкими бровками |
| 15 | Слабонаклонные междуречья, местами слабодренированные, с единичными суффозионными западинами | | |

V - Приречный ландшафтный уровень

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 17 | Придолинные покатоности хорошо дренированные | 18 | Покато-увалистые поверхности II надпойменной террасы |
|----|--|----|--|

VI - Балочный ландшафтный уровень

- | | | | |
|----|--|----|--------------|
| 19 | Крупные балки с нерасчленным комплексом склонов и днищ | 20 | Мелкие балки |
|----|--|----|--------------|

В - Ландшафт холмисто-увалистых структурно-денудационных равнин, сложенных покровно лёссовидными суглинками под злаково-разнотравными степями

VII - Междуречный ландшафтный уровень

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 21 | Водораздельные останцы хорошо дренированные | 24 | Прилощинные склоны, слабодренированные |
| 22 | Выпуклые останцовые плакоры хорошо дренированные | 25 | Узкие ложбины с четкими бровками |
| 23 | Волнистые междуречья, слабодренированные, с большим количеством суффозионных западин и единичными карстовыми формами | 26 | Узкие ложбины с четкими бровками |

VIII - Приречный ландшафтный уровень

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 27 | Слабовыпуклые плакоры хорошо дренированные | 28 | Придолинные покатоности хорошо дренированные |
| 29 | Овражно-увалистые поверхности II надпойменной террасы | | |

X - Балочный ландшафтный уровень

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 30 | Полого-поклатые склоны сложных балок | 34 | Средние балки с нерасчленным комплексом склонов и днищ |
| 31 | Сильно эродированные склоны сложных балок | 35 | Мелкие балки с нерасчленным комп-м склонов и днищ |
| 32 | Склоны сложных балок, часто крутые, с выходами известняков | 36 | Эрозионные рытвины |
| 33 | Балочные поймы | | |

Г - Ландшафт террасированных речных долин, сложенных аллювиальными отложениями, местами перекрытыми покровными суглинками, под пойменными лесами и лугами, преимущественно распаханными

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 37 | Сильно эродированные уступы | 42 | Поверхности низкой поймы со старицами и западинами |
| 38 | Эродированные уступы с выходами известняков | 43 | Устья сложных балок |
| 39 | Плоские поверхности I надпойменной террасы | 44 | Устья мелких балок |
| 40 | Плоские поверхности высокой поймы | | Эрозионные потяжины |
| 41 | Плоские поверхности средней поймы | | Суффозионные западины |

Рис. 4. Ландшафтные комплексы в зоне видимости (выделены штриховкой) с обзорных точек экологической тропы музея-заповедника “Куликово поле” (Ландшафтная карта составлена В.Н. Солнцевым и Н.Н. Калущковой, 1989 г.).

Fig. 4. Landscape complexes in the visibility zone (highlighted by hatching) from observation points of the ecological trail of the Museum-Reserve “Kulikovo pole”. (Landscape map compiled by V.N. Solntsev and N.N. Kalutskova, 1989).

помощи инструмента пространственного пересечения *Intersect* в пределах каждой буферной зоны выделялись видимые природные объекты (рис. 5).

Результаты полевых исследований и данные автоматизированной обработки дали возможность установить корреляцию показателей. С двух рассматриваемых обзорных точек открываются все три перспективы: ближняя, средняя и дальняя. Таким образом, при оценке данного показателя и в полевой оценке, и в дистанционной оценке был поставлен максимальный балл (2).

Общая лесистость пейзажа. Показатель общей лесистости определяется отношением площади лесных массивов к общей площади зоны видимости вплоть до линии горизонта [18]. Так как территория исследования относится к лесостепной зоне, было решено адаптировать методику оценки и присвоить оценочные баллы исходя из рассчитанной доли лесных насаждений следующим образом: для низкой степени лесистости – до 15% – присваивалось 0 баллов, для средней степени, т.е. от 15 до 25%, оценка составляла 1 балл, для высокой степени – более 25% – 2 балла.

Оценка показателя лесистости пейзажа проводилась на основе ортофотоплана вдоль экологической тропы, за пределами аэрофотосъемки с БПЛА для оценки использовались безоблачные спутниковые снимки с более низким пространственным разрешением Landsat-8 OLI за 2018–2021 гг. Лесные массивы идентифицировались с помощью классификации типов ландшафтного покрова. В данном случае классификация осуществлялась посредством метода минимального расстояния (Minimum Distance Classification), осуществляемой на основании сравнения расстояний между пикселями изображения и средними значениями классов яркости в многофункциональном пространстве. Полученное растровое изображение было генерализовано с целью

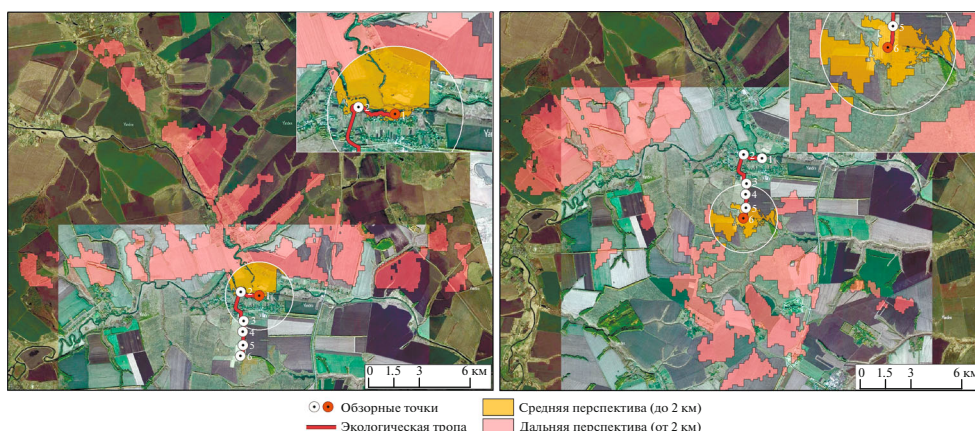


Рис. 5. Видимые природные объекты, открывающиеся в средней и дальней перспективах с обзорных точек № 1 (слева) и № 6 (справа).

Fig. 5. Visible natural objects within the medium and long-range perspectives from observation points No. 1 (left) and No. 6 (right).

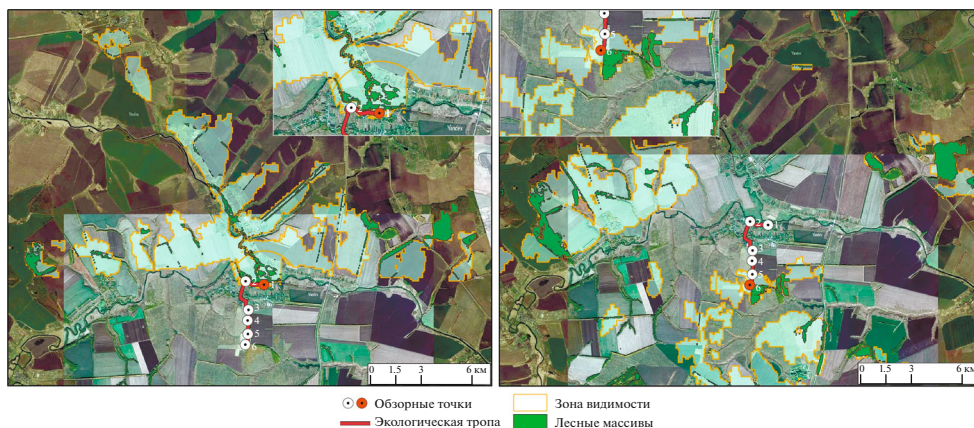


Рис. 6. Залесенные территории в пределах зон видимости для обзорных точек №1 (слева) и № 6 (справа).

Fig. 6. Forest areas within the visibility zones for observation points No. 1 (left) and No. 6 (right).

устранения ошибочных данных растра при помощи инструмента *Majority Filter*, а затем преобразовано из растрового в векторное — инструмент *Raster to Polygon*. Из полученного векторного слоя был извлечен отдельный класс с лесными насаждениями. При помощи совмещения данных — инструмент *Intersect* — было произведено вычисление площади и доли лесных насаждений в пределах зон видимости с обзорных точек (рис. 6).

Сравнивая результаты полевых исследований с полученными данными ГИС-анализа, можно отметить, что оценки довольно близки. Так, доля залесенных территорий для обзорной точки № 1 составляет 10.2%, что соответствует низкой степени лесистости пейзажа. Такая же оценка была дана в полевых условиях. Для обзорной точки № 6 доля залесенных территорий выше и составляет 19.7%. Такой показатель оценивается как средняя степень лесистости пейзажа, что совпадает с полевой оценкой.

Обилие открытых пространств в пейзаже. На территории Куликова поля открытыми пространствами служат многочисленные поля. Они усложняют восприятие пейзажа, тем самым повышая его аттрактивные качества. В полевых условиях оценка проводится путем подсчета видимых открытых пространств, а затем согласно их количеству присваивается определенный балл. Согласно исследованиям К.И. Эрингиса, выделение повышенного числа однородных объектов в пределах определенного угла наблюдения может привести к занижению эстетической оценки [18]. Оцениваемые нами обзорные точки имеют панорамный и циркурамный угол обзора (от 180 до 360 градусов). В данном случае было установлено оптимальное пороговое значение — не более 12 объектов, после превышения которого оценочный балл показателя снижается. С применением ГИС данный показатель оценивался путем совмещения отдельного класса с сельскохозяйственными полями с соответствующими зонами видимости.

Следует отметить, что при прямом подсчете количество открытых пространств получается несколько ниже, чем при дистанционной оценке с применением ГИС-анализа. В ближней и средней перспективах открытые пространства воспринимаются наблюдателем достаточно четко. В дальней перспективе поля теряют очертание своих границ и начинают сливаться между собой. Автоматизированная оценка несколько завышает результаты, что связано с использованием исходных данных высокого пространственного разрешения. Нами было проведено агрегирование близкорасположенных открытых пространств в группы при помощи инструмента *Aggregate Polygon*. В

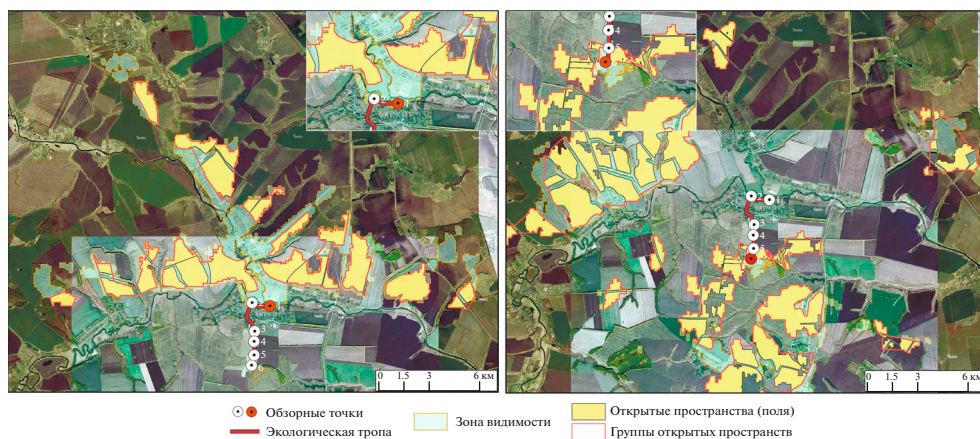


Рис. 7. Агрегирование открытых пространств в группы для обзорных точек № 1 (слева) и № 6 (справа).

Fig. 7. Aggregation of open spaces into groups for observation points No. 1 (left) and No. 6 (right).

пределах средней перспективы нами объединялись поля, которые находятся на расстоянии менее 0.5 км, в пределах дальней перспективы – на расстоянии менее 2 км (рис. 7).

Таким образом, при прямом подсчете в полевых условиях на обзорной точке № 1 количество открытых пространств составило 9 полей, при автоматизированной обработке данных – 11. На обзорной точке №6 при прямом подсчете выделено 13 полей, при автоматизированном – 17. При переводе количественных показателей в баллы об-

Таблица 1. Сравнение данных полевой оценки и результатов дистанционной съемки в отношении эстетических свойств ландшафтов в зоне видимости обзорных точек экологической тропы
Table 1. Comparison of field assessment data and remote survey results regarding the aesthetic properties of landscapes in the zones of sight of the observation points of the ecological trail

№ обзорной точки	Эстетические параметры пейзажа в зоне видимости					
	глубина и разнообразие перспектив		общая лесистость		обилие открытых пространств (полей)	
	полевая оценка	ГИС-оценка	полевая оценка	ГИС-оценка	полевая оценка	ГИС-оценка
1	с, д (2)	с, д (2)	>15% (0)	10.2% (0)	9 ед. (4)	11ед. (4)
2	с, д (2)	с, д (2)	>15% (0)	10.5% (0)	8 ед. (4)	9 ед. (4)
3	с, д (2)	с, д (2)	>15% (0)	14.5% (0)	7 ед. (3)	9 ед. (4)
4	с, д (2)	с, д (2)	15–25% (1)	15.4% (1)	8 ед. (3)	12 ед. (4)
5	с, д (2)	с, д (2)	15–25% (1)	15.4% (1)	10 ед. (4)	14 ед. (3)
6	с, д (2)	с, д (2)	15–25% (1)	19.6% (1)	13 ед. (3)	16 ед. (3)

Глубина и разнообразие перспектив: ближняя перспектива выделяется всегда – 0 баллов, средняя (с) – 1 балл, дальняя (д) – 1 балл, сочетание обеих (с, д) – 2 балла. Общая лесистость пейзажа: низкая (Н) – до 15% – 0 баллов, средняя (С) – от 15 до 25% – 1 балл, высокая (В) – более 25% – 2 балла. Обилие открытых пространств (полей) в пейзаже: до 1–2 единиц – 1 балл, 3–4 – 2 балла, 5–7 – 3 балла, 8–12 – 4 балла.

зорной точке № 1 было присвоено 4 балла, а обзорной точке № 6 – 3 балла. Можно отметить, что и для этого показателя мы получили хорошее соответствие результатов полевых исследований с данными ГИС-анализа.

Подобным образом сделана оценка всех обзорных точек (табл. 1), которая показывает, что дистанционная съемка может быть использована для симуляции восприятия наблюдателем в любой точке.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый подход ранее был опробован нами в горной территории Северо-Западной Болгарии на примере двух показателей – глубины и разнообразия перспектив и общей лесистости пейзажа [16, 17]. В этой работе мы показываем, что подобную оценку с применением ГИС-технологий можно проводить на менее выразительных и более антропогенно освоенных равнинных территориях. Для территории музея-заповедника “Куликово поле” были исследованы три параметра эстетической оценки – глубина и разнообразие перспектив, общая лесистость пейзажа и обилие открытых пространств пейзажа. Первые два параметра показали хорошее соответствие с данными полевых наблюдений, а третий параметр потребовал введение небольших поправок для дальних перспектив. В целом, полученные результаты ГИС-оценки подтверждают, что данный метод оценки позволяет производить расчеты ряда эстетических показателей с высоким уровнем точности, сопоставимым с данными полевых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бибеева А.Ю., Макаров А.А.* Применение ГИС для расчета комплексных показателей эстетической оценки ландшафтов // Изв. Иркутского гос. ун-та. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 24. С. 17–33. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.24.17>
2. *Бредихин А.В.* Эстетическая оценка рельефа при рекреационно-геоморфологических исследованиях // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2005. № 3. С. 7–13.
3. *Бурова О.В.* Опыт картографирования трансформации исторического ландшафта Куликова Поля: методы и результаты // Изв. Тульского гос. ун-та. Серия Естественные науки. 2019. С. 109–118.
4. *Вдовюк Л.Н., Мотошина А.А.* Методические приемы оценки эстетических свойств ландшафтов Тюменской области // Вестник Тюменского гос. ун-та. 2013. № 4. С. 58–66.
5. *Горбунова Т.Ю., Горбунов Р.В., Ключкина А.А.* Оценка пейзажно-эстетической ценности ландшафтов Юго-Восточного Крыма // Ученые записки Крымского фед. ун-та им. В.И. Вернадского. Серия: География. Геология. 2017. Т. 3 (69). № 3. Ч. 2. С. 237–249.
6. *Горбунов Р.В., Табущик В.А., Горбунова Т.Ю.* Нерешенные теоретические и методологические вопросы при эстетической оценке ландшафтов // Географический вестник. 2020. № 3(54). С. 6–22. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-6-22>
7. *Дирин Д.А.* Оценка и рекреационное использование пейзажно-эстетических ресурсов Усть-Коксинского района Республики Алтай. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. РАН. 2007. 206 с.
8. *Калашникова О.В.* Пейзажеобразующее значение элементов ландшафтной структуры // Проблемы геологии и географии Сибири: материалы науч. конф. Вестник Томского гос. ун-та. 2003. № 3. С. 90–93.
9. *Колбовский Е.Ю., Медовикова У.А.* Оценка эстетических свойств ландшафтов для управления территориями выдающейся культурно-исторической и природной ценности // Известия РГО. 2016. Т. 148. № 3. С. 61–75.
10. *Кочуров Б.И., Бучацкая Н.В.* Оценка эстетического потенциала ландшафтов // Юг России: экология и развитие. 2007. № 4. С. 25–34. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2007-4-25-34>
11. *Мухина Л.И.* Опыт разработки методики рекреационной оценки природных комплексов // Географические проблемы организации отдыха и туризма. М.: 1975. Вып. 2. С. 3–13.
12. *Назаров Н.Н., Постников Д.А.* Оценка пейзажно-эстетической привлекательности ландшафтов Пермской области для целей туризма и рекреации // Известия РГО. 2002. Вып. 4. С. 3–18.
13. *Николаев В.А.* Ландшафтоведение: эстетика и дизайн. Учебное пособие // М.: Аспект Пресс. 2005. 176 с.

14. *Ротанова И.Н., Васильева О.А.* Оценка эстетической привлекательности ландшафтов проектируемого природного парка “Предгорье Алтая” с применением геоинформационных технологий // Наука и туризм: стратегии взаимодействия. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та. 2017. Вып. 7(5). С. 29–36.
15. *Фролова М.Ю.* Оценка эстетических достоинств природных ландшафтов // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5: География. 1994. № 24. С. 27–33.
16. *Шеремет Э.А., Дехнич В.С., Калуцкова Н.Н.* Возможности применения ГИС-технологий для оценки визуальных свойств ландшафтов при организации геопарков // Известия РГО. 2020. Т. 152. № 6. С. 69–78.
<https://doi.org/10.31857/S0869607120060063>
17. *Шеремет Э.А., Калуцкова Н.Н., Дехнич В.С.* Визуальные свойства ландшафтов и методы их оценки с применением ГИС (на примере Белоградчишских скал (Болгария)) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. С. 191–204.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-191-204>
18. *Эрингис К.И., Будрюнас А.-Р.А.* Сущность и методика детального эколого-эстетического исследования пейзажей // Экология и эстетика ландшафта. Вильнюс: Минтис, 1975. С. 107–170.
19. *Cwiakala P., Kocierz R., Puniach E., Nedzka M., Mamczarz K., Niewiem W., Wiacek P.* Assessment of the possibility of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for the documentation of hiking trails in Alpine areas // Inter. Journ. Sensors by MDPI. 2017. V. 18. Iss. 1. P. 1–28.
<https://doi.org/10.3390/s18010081>
20. *Dronin N., Kalutskova N., Dekhnich V., Sheremet E.* History Of Scenery Studies in Russian Geography // 9th Conference of the European Society for the History of Science. Visual, Material and Sensory Cultures of Science, Università di Bologna, 2020. pp. 183–184.
21. *Hackney C., Clayton A.* Unmanned aerial vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping // Geomorphological Techniques. 2015. Chap. 1. Sec. 1.7. P. 1–15. ISSN 2047-0371.
22. *Shaoyu L., Weijie D., Yongbo Y.* Application of UAV oblique photograph modeling technology in mountain tourism planning // 3rd International Symposium on EEEMS. Francis Academic Press. 2018. P. 240–245.
<https://doi.org/10.25236/eeems.2018.047>
23. *Shiou Y., Chengju D., Zhihui C., Hao W., Kailang G., Yirong L., Yongjie C., Wenyan L., Qiang F., Wenbo L.* Assessing safety and suitability of old trails for hiking using ground and drone surveys // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020. V. 9 (4). P. 221–238.
<https://doi.org/10.3390/ijgi9040221>

Evaluation of the Aesthetic Properties of Plain Landscape by Remote Earth Sounding Methods (Case Study of the Museum-Reserve “Kulikovo Pole”)

N. N. Kalutskova¹, * and E. A. Lozbeneva¹, **

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**E-mail: kalutskova@gmail.com*

***E-mail: elina7-sheremet@mail.ru*

Abstract—The aesthetic properties of landscapes are traditionally determined on the basis of a system of visual indicators in the course of field surveys along individual routes. The possibility of using remote methods in such studies depends on the agreement of their results with field data. The article compares the results of the aesthetic assessment of the landscapes of the museum-reserve “Kulikovo pole” based on traditional field methods and high-resolution images obtained from unmanned aerial vehicles (UAVs). The study was carried out in May 2021 for the museum’s ecological trail, about 6 km long, on which observation points with panoramic views are marked, typical for the landscape of hilly-ridged structural-denudation plains. Using the example of three indicators—depth and variety of perspectives, forest coverage and abundance of open spaces in the landscape—it is demonstrated that the method of aesthetic assessment of landscapes based on the combined data of DTM (2 m resolution) and SRTM DEM (30 m resolution) allows you to determine these visual indicators with good match with field results. In some cases, it is required to use corrections because of visual distortion associated with the remoteness of the observed objects. It is shown that the method of aesthetic assessment of landscapes using GIS technologies, which was previously carried out for mountainous areas, can be used for less expressive relief and anthropogenically transformed flat landscapes.

Keywords: aesthetics of the landscape, museum-reserve “Kulikovo pole”, ecological trail, aesthetic attractiveness, aesthetic characteristics of the landscape, visibility deepness

REFERENCES

1. Bibaeva A. Yu., Makarov A.A. Primenenie GIS dlya rascheta kompleksnyh pokazatelej esteticheskoi ocenki landshaftov // *Izv. Irkutskogo gos. un-ta. Seriya Nauki o Zemle*. 2018. T. 24. S. 17–33. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.24.17>
2. Bredihin A.V. Esteticheskaya ocenka rel'efa pri rekreacionno-geomorfologicheskikh issledovaniyah // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5: Geografiya*. 2005. № 3. S. 7–13.
3. Burova O.V. Opyt kartografirovaniya transformacii istoricheskogo landshafta Kulikova Polya: metody i rezul'taty // *Izv. Tul'skogo gos. un-ta. Seriya Estestvennye nauki*. 2019. S. 109–118.
4. Vdovyuk L.N., Motoshina A.A. Metodicheskie priemy ocenki esteticheskikh svojstv landshaftov Tyumenskogo gos. un-ta. 2013. № 4. S. 58–66.
5. Gorbunova T.Yu., Gorbunov R.V., Klyuchkina A.A. Ocenka pejzazhno-esteticheskoi cennosti landshaftov Yugo-Vostochnogo Kryma // *Uchenye zapiski Krymskogo fed. un-ta im. V.I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya. Geologiya*. 2017. T. 3 (69). № 3. Ch. 2. S. 237–249.
6. Gorbunov R.V., Tabunshchik V.A., Gorbunova T.Yu. Nereshennyye teoreticheskie i metodologicheskie voprosy pri esteticheskoi ocenke landshaftov // *Geograficheskij vestnik*. 2020. № 3(54). S. 6–22. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-6-22>
7. Dirin D.A. Ocenka i rekreacionnoe ispol'zovanie pejzazhno-esteticheskikh resursov Ust'-Koksinskogo rajona Respubliki Altaj. Novosibirsk: Izd-vo Sib. otd. RAN, 2007. 206 s.
8. Kalashnikova O.V. Pejzazheobrazuyushchee znachenie elementov landshaftnoj struktury // *Problemy geologii i geografii Sibiri: materialy nauch. konf. Vestnik Tomskogo gos. un-ta*. 2003. № 3. S. 90–93.
9. Kolbovskij E.Yu., Medovikova U.A. Ocenka esteticheskikh svojstv landshaftov dlya upravleniya territoriyami vydayushchejsya kul'turno-istoricheskoi i prirodnoj cennosti // *Izvestiya RGO*. 2016. T. 148. № 3. S. 61–75.
10. Kochurov B.I., Buchackaya N.V. Ocenka esteticheskogo potenciala landshaftov // *Yug Rossii: ekologiya i razvitie*. 2007. № 4. S. 25–34. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2007-4-25-34>
11. Muhina L.I. Opyt razrabotki metodiki rekreacionnoj ocenki prirodnyh kompleksov // *Geograficheskie problemy organizacii otdyha i turizma*. M.: 1975. Vyp. 2. S. 3–13.
12. Nazarov N.N., Postnikov D.A. Ocenka pejzazhno-esteticheskoi privlekatel'nosti landshaftov Permskogo gos. un-ta dlya celej turizma i rekreacii // *Izvestiya RGO*. 2002. Vyp. 4. S. 3–18.
13. Nikolaev V.A. Landshaftovedenie: estetika i dizajn. Uchebnoe posobie // M.: Aspekt Press. 2005. 176 s.
14. Rotanova I.N., Vasil'eva O.A. Ocenka esteticheskoi privlekatel'nosti landshaftov proektiruemogo prirodnogo parka "Predgor'ye Altaya" s primeneniem geoinformacionnyh tekhnologij // *Nauka i turizm: strategii vzaimodejstviya*. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta. 2017. Vyp. 7(5). S. 29–36.
15. Frolova M.Yu. Ocenka esteticheskikh dostoinstv prirodnyh landshaftov // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5: Geografiya*. 1994. № 24. S. 27–33.
16. Sheremet E.A., Dekhnich V.S., Kaluckova N.N. Vozmozhnosti primeneniya GIS-tekhnologij dlya ocenki vizual'nyh svojstv landshaftov pri organizacii geoparkov // *Izvestiya RGO*. 2020. T. 152. № 6. S. 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0869607120060063>
17. Sheremet E.A., Kaluckova N.N., Dekhnich V.S. Vizual'nye svojstva landshaftov i metody ih ocenki s primeneniem GIS (na primere Belogradchishskih skal (Bolgariya)) // *InterKarto. InterGIS*. 2021. T. 27. S. 191–204. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-191-204>
18. Eringis K.I., Budryunas A.-R.A. Sushchnost' i metodika detal'nogo ekologo-esteticheskogo issledovaniya pejzazhej // *Ekologiya i estetika landshafta*. Vil'nyus: Mintis, 1975. S. 107–170.
19. Cwiakala P., Kocierz R., Puniach E., Nedzka M., Mamczarz K., Niewiem W., Wiacek P. Assessment of the possibility of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for the documentation of hiking trails in Alpine areas // *Inter. Journ. Sensors by MDPI*. 2017. V. 18. Iss. 1. P. 1–28. <https://doi.org/10.3390/s18010081>
20. Dronin N., Kalutskova N., Dekhnich V., Sheremet E. History Of Scenery Studies in Russian Geography // 9th Conference of the European Society for the History of Science. Visual, Material and Sensory Cultures of Science, Università di Bologna, 2020. pp. 183–184.
21. Hackney C., Clayton A. Unmanned aerial vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping // *Geomorphological Techniques*. 2015. Chap. 1. Sec. 1.7. P. 1–15. ISSN 2047-0371.
22. Shaoyu L., Weijie D., Yongbo Y. Application of UAV oblique photograph modeling technology in mountain tourism planning // 3rd International Symposium on EEEMS. Francis Academic Press. 2018. P. 240–245. <https://doi.org/10.25236/eeems.2018.047>
23. Shiou Y., Chengju D., Zhihui C., Hao W., Kailang G., Yirong L., Yongjie C., Wenyan L., Qiang F., Wenbo L. Assessing safety and suitability of old trails for hiking using ground and drone surveys // *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2020. V. 9 (4). P. 221–238. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040221>

ВНУТРЕННИЙ ТУРИЗМ В МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ СЗФО: СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ И ВЛИЯНИЕ ПАНДЕМИИ COVID-19

© 2022 г. И. А. Иванов^{a, *}, Т. В. Васильева^{a, **},
И. Н. Красильникова^{a, ***}, А. Г. Манаков^{a, ****}

^a Псковский государственный университет, Псков, Россия

*E-mail: ii60@bk.ru

**E-mail: tatyana_korotche@mail.ru

***E-mail: mulia777@mail.ru

****E-mail: region-psk@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.08.2022 г.

После доработки 14.09.2022 г.

Принята к публикации 30.09.2022 г.

В настоящее время в географии туризма быстро развивается направление исследований по изучению динамики и направленности туристских потоков, которое опирается на официальную статистику на уровне государств, регионов и низовых административных единиц. В 2022 г. Росстатом была впервые предоставлена статистика прибытий и ночевок по муниципальным образованиям страны, что позволило авторам статьи осуществить их классификацию по данным показателям за 2021 г. в Северо-Западном федеральном округе. Классификация муниципальных образований строилась на основе шести показателей, характеризующих объем туристского потока и степень развитости гостинично-ресторанной инфраструктуры. Северо-Западный федеральный округ из-за пандемии COVID-19 испытал значительное сокращение туристского потока в 2020 г. Однако на фоне семикратного уменьшения въездного туристского потока внутренний турпоток сократился только на четверть. При этом уже в 2021 г. в федеральном округе произошел почти полторакопный рост внутреннего турпоточка, что позволило ему более чем на треть заместить сокращение въездного турпоточка в первый год пандемии. Картографический анализ, сопровождающий разработку классификации муниципальных районов, позволил увидеть внутрирегиональные различия по величине турпоточка и развитости туристской инфраструктуры, которые не прослеживаются при анализе туристской статистики на региональном уровне. Так, в ходе исследования был выявлен ряд туристских аномалий внутри регионов, когда объем турпоточка не соответствует степени развития имеющейся гостинично-ресторанной инфраструктуры. Результаты исследования могут быть использованы при планировании развития туризма.

Ключевые слова: COVID-19, объем турпоточка, внутренний туризм, гостинично-ресторанная инфраструктура, коллективные средства размещения

DOI: 10.31857/S0869607122050044

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. в связи с объявлением пандемии COVID-19 ограничения на перемещение между странами привели к изменению существовавшей прежде географии туристских потоков. Это коснулось, в первую очередь, международного турпоточка, который в большинстве стран мира сократился многократно. В связи с этим в России стало

больше внимания уделяться развитию внутреннего туризма. Хотя интерес к рассмотрению состояния внутреннего туризма в российских регионах существует давно, пандемия COVID-19 придала новый импульс исследованиям в этом направлении. Например, анализу современного состояния внутреннего туризма в регионах России в период пандемии посвящена работа [22]. При этом большинство таких исследований выполнено на уровне отдельных регионов страны. Чаще всего в них рассматриваются перспективы развития различных видов туризма. Так, например, в пределах регионов Северо-Западного федерального округа внимание обращается на возможности развития экологического [12, 28], сельского [2, 11, 16], этнографического [26], религиозного туризма [4], а также таких достаточно специфических видов, как геотуризм [5], гастрономический [1, 7], конный [27], железнодорожный туризм [23] и др. Также можно отметить работы, посвященные развитию регионального туризма в контексте программ приграничного сотрудничества, например, в Республике Карелия [13, 14].

На изучение возможностей внутреннего туризма в восстановлении общего турпотока в период пандемии COVID-19 обращается внимание не только в России, но и за рубежом. Этому, например, посвящены труды итальянских [34], турецких [29, 30], южнокорейских [33], новозеландских [31] и др. исследователей. На место внутреннего туризма в общей величине турпотока в Финляндии и Эстонии в начальный период пандемии было обращено внимание в одной из наших публикаций [32]. Что же касается исследований, посвященных состоянию туризма в этот период в субъектах Северо-Западного федерального округа [10], или в регионах Европейского Севера [7, 15], то они опираются преимущественно на статистику Росстата за 2020 г., а также на другие источники на региональном уровне, и не затрагивают муниципальный уровень.

Следует отметить, что исследования по изучению инфраструктуры туризма и величины турпотока на внутрирегиональном (муниципальном) уровне являются единичными в Северо-Западном федеральном округе. Например, можно обратить внимание на публикации, где анализируется динамика развития туризма в муниципальных образованиях Новгородской области [9], или рассматриваются территориальные диспропорции в размещении инфраструктуры туризма в Республике Карелия [25]. Особо нужно отметить работу, где с помощью оригинальной методики были определены приоритетные виды туризма для муниципальных образований Республики Коми [8].

Внутрироссийский (в статье рассматривается как “внутренний”) туризм имеет ряд особенностей, которые создали ему преимущества перед международным (въездным и выездным) туризмом в период пандемии. В частности, внутри страны карантинные ограничения являются более мягкими, что дает возможность сохранять существующие направления внутреннего туризма, и даже переориентировать на некоторые из них часть потенциального выездного турпотока. По этой причине становится актуальным изучение пространственной организации туристской сферы в регионах России, в т.ч. и на муниципальном уровне.

Целью данной работы является классификация муниципальных районов Северо-Западного федерального округа по степени развитости туристской инфраструктуры и размеру турпотока в 2021 г.

Для реализации данной цели в ходе исследования было последовательно решено пять задач:

- определены особенности динамики турпотока (числа прибытий в коллективные средства размещения) с 2019 по 2021 гг. на уровне регионов Северо-Западного федерального округа (СЗФО);
- оценена емкость гостинично-ресторанной инфраструктуры (HoReCa) в 2021 г. на уровне муниципальных образований СЗФО;
- выявлены пространственные различия в распределении таких показателей, как объем турпотока и средняя продолжительность пребывания туристов в муниципальных образованиях СЗФО в 2021 г.;

- рассчитана туристская нагрузка в муниципальных образованиях СЗФО в расчете на 1 тыс. жителей;
- на основе сопоставления проанализированных показателей разработана классификация муниципальных образований СЗФО по объему турпотока и степени развитости инфраструктуры HoReCa.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве источника информации в исследовании выступает база данных показателей муниципальных образований Росстата на 2021 г. [3]. На их основе рассчитаны следующие показатели: 1) количество мест в заведениях общепита на 1 тыс. жителей (данный показатель позволяет сравнить степень развитости общепита в районе; поскольку он зависит от численности населения, показатель пересчитан в душевом выражении; использованы данные 2020 г., так как по 2021 г. эти данные отсутствуют); 2) количество мест в коллективных средствах размещения (КСР); 3) средняя продолжительность пребывания (количество ночевки на 1 прибытие); 4) количество размещенных лиц в КСР; 5) количество размещенных в КСР на 1 тыс. жителей (отражает туристскую нагрузку на местное население); 6) количество ночевки на 1 место в КСР (отражает степень загруженности номерного фонда, а косвенно – среднегодовую востребованность без учета сезонности). Выбор данных показателей обусловлен наличием актуальных данных.

Ранее аналогичная методика расчета была использована нами при осуществлении оценки величины туристского потока в приграничных с Норвегией, Финляндией, Эстонией и Латвией регионах Северо-Западного федерального округа России [20, 21]. Однако ранее была доступна статистика только на региональном уровне, но в 2022 г. появились данные по муниципальным образованиям за 2021 г. Кроме того, статья опирается на методические наработки, представленные в работах, посвященных анализу экономического состояния индустрии туризма России в условиях пандемии [17, 19], развитию туристской инфраструктуры в конкретных регионах [6, 24, 35] и мониторингу качества туристских услуг на муниципальном уровне [18].

Было рассмотрено 200 муниципальных образований в СЗФО (за исключением С.-Петербурга, который не был разделен на внутригородские районы), при этом статистические данные по КСР представлены по 142 муниципальным образованиям. При осуществлении классификации муниципальные образования были разделены на три группы по объему турпотока и по степени развитости гостинично-ресторанной инфраструктуры HoReCa (от первых букв слов “Hotel–Restaurant–Catering/Café”, т.е. “отель–ресторан–кейтеринг/кафе”). Степень развитости инфраструктуры HoReCa рассчитана на основе показателей 1 и 6: по каждому из них районы разбиты на децильные группы (первая – с наименьшими значениями, десятая – с наибольшими). Номер группы соответствует баллу, присваиваемому району по данному показателю. Затем баллы двух показателей суммировались – сумма соответствует степени развитости инфраструктуры HoReCa. Для удобства восприятия районы разделены на три группы по сумме баллов: со слаборазвитой, среднеразвитой и наиболее развитой инфраструктурой HoReCa. С.-Петербург исключен из классификации из-за показателей, отличающихся на порядок от остальных, что связано с более высоким статусом города по сравнению с другими районами и городами Северо-Западного федерального округа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общий объем туристского потока (согласно гостиничной статистике) в Северо-Западном федеральном округе в 2020 г. сократился по сравнению с 2019 г. на 40%, однако это произошло, главным образом, из-за резкого уменьшения въездного турпотока – на 85.7%

Таблица 1. Объем турпотока в регионах Северо-Западного федерального округа в 2019–2021 гг.
Table 1. The volume of tourist flow in the regions of the Northwestern Federal District in 2019–2021

	Турпоток в 2019 г., тыс. чел.		Турпоток в 2020 г., тыс. чел.		Турпоток в 2021 г., тыс. чел.		Прирост внутреннего турпотока, тыс. чел.	
	внутренний	въездной	внутренний	въездной	внутренний	въездной	2020 г./2019 г.	2021 г./2020 г.
Псковская область	388	39	249	8	360	9	–139	+111
Новгородская область	345	9	247	3	324	4	–98	+77
Ленинградская область	1063	108	954	12	1238	12	–109	+284
Республика Карелия	435	48	381	7	558	7	–54	+177
Мурманская область	264	56	226	31	336	21	–38	+110
Вологодская область	465	12	280	2	370	2	–185	+90
Архангельская область	347	0.3	196	0.01	329	0.01	–151	+133
Ненецкий АО	8	5	6	2	10	2	–2	+4
Республика Коми	185	48	141	3	189	5	–44	+48
Калининградская область	557	99	515	13	821	12	–42	+306
С.-Петербург	3836	2269	2777	304	4217	317	–1059	+1440
Итого СЗФО	7893	2693	5972	385	8752	391	–1921	+2780

или примерно в 7 раз. Многократное сокращение въездного турпотока произошло во всех регионах СЗФО, но особенно от этого пострадал С.-Петербург, который в 2019 г. концентрировал 84.3% въездного турпотока в СЗФО. Сокращение же объема внутреннего турпотока в 2020 г. было не столь значительным и составило 24.3% (табл.).

2021 г. характеризовался ростом турпотока во всех регионах СЗФО, в чем решающую роль сыграл внутренний туризм. Хотя по общему объему турпотока федеральный округ не вышел на уровень 2019 г. (сокращение составило 13.6%), произошел почти полторакратный рост внутреннего турпотока, и в итоге в 2021 г. он на 10.9% превзошел уровень 2019 г. По сравнению с другими федеральными округами России, СЗФО в 2021 г. показал наилучшую динамику по приросту внутреннего турпотока по отношению к 2019 г. Основной вклад в этот прирост внесли С.-Петербург и Ленинградская область (+381 и +175 тыс. прибытий соответственно), Калининградская область (+265 тыс.) и Республика Карелия (+123 тыс.). При этом по объему сокращения иностранного турпотока СЗФО (–2.3 млн прибытий или –85.5%) занимает второе место среди федеральных округов страны: в абсолютном выражении его опережает Центральный федеральный округ (–4.1 млн прибытий), а в относительном – Дальневосточный (–86.8%).

Второй этап исследования включал оценку емкости гостинично-ресторанной инфраструктуры (HoReCa) в 2021 г. на уровне муниципальных образований СЗФО (рис. 1).

Вместимость заведений общепита разнится не очень значительно. Как правило, наихудшие показатели характеризуют периферийные районы. Также плохо общепит развит в пригородной зоне С.-Петербурга, так как, с одной стороны, местное население активно пользуется более развитой инфраструктурой крупного города, а с другой – высо-

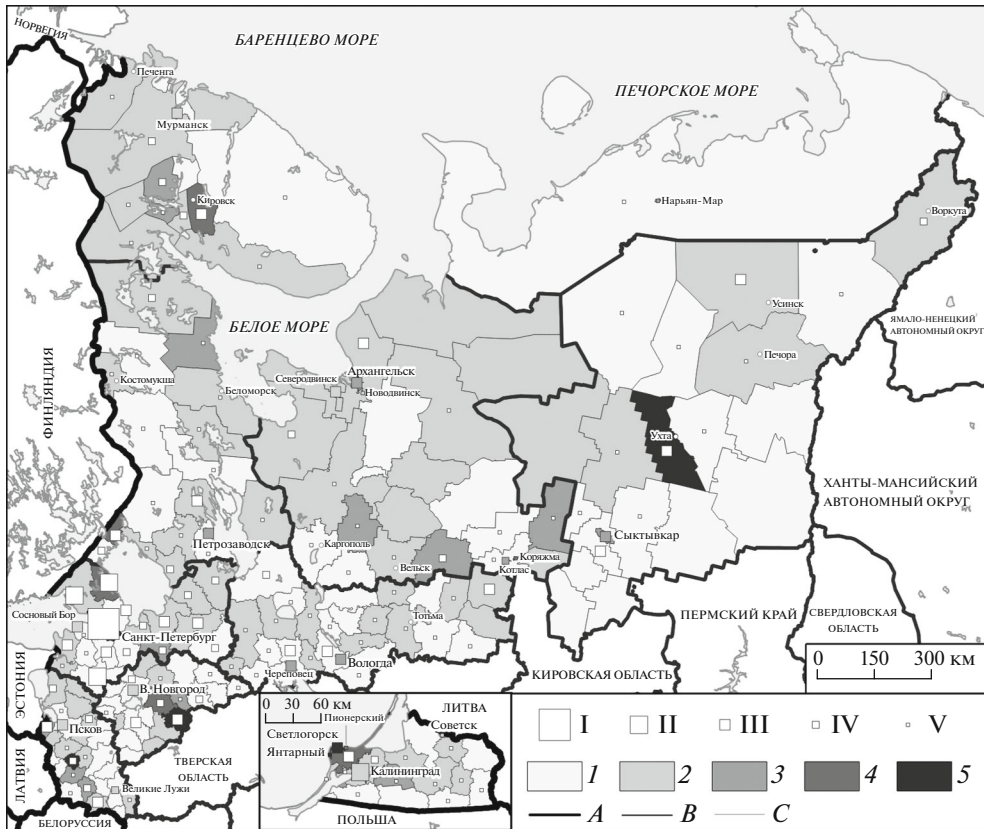


Рис. 1. Емкость гостинично-ресторанной инфраструктуры в 2021 г. Количество мест в заведениях общепита на 1 тыс. жителей (2020 г.): 1 – менее 30, 2 – 30–49, 3 – 50–69, 4 – 70–100, 5 – более 100. Количество мест в коллективных средствах размещения (тыс., 2021 г.): I – более 100, II – 5–15, III – 1–4, IV – 0.5–0.9, V – менее 0.5. Границы: А – государственные, В – субъектов РФ, С – муниципальных районов, муниципальных и городских округов.

Fig. 1. Capacity of hotel and restaurant infrastructure in 2021. The number of places in catering establishments per 1 thousand inhabitants (2020): 1—less than 30, 2—30–49, 3—50–69, 4—70–100, 5—more than 100. Number of places in collective accommodation facilities (thousand, 2021): I—more than 100, II—5–15, III—1–4, IV—0.5–0.9, V—less than 0.5. Borders: А—state, В—Russian Federation’s regions, С—municipal districts, municipal and urban okrugs.

кие значения турпотока объясняются особенностями местного туризма – он чаще имеет формат отдыха на природе (загородные базы отдыха). Наилучшие показатели демонстрируют некоторые районы с выраженной туристской специализацией и небольшой численностью населения, например, Пушкиногорский район (Псковская обл.), Приозерский район (Ленинградская обл.), Сортавальский район (Республика Карелия), Кировск (Мурманская обл.), Светлогорск и Зеленоградский район (Калининградская обл.) и др.

Очевидно, что лидерами по насыщенности гостиничной инфраструктурой являются крупные города – региональные центры. Среди других районов высокой обеспеченностью отличаются Печорский и Невельский районы (Псковская обл.), Старорусский и Валдайский районы (Новгородская обл.), Кондопожский район (Республика

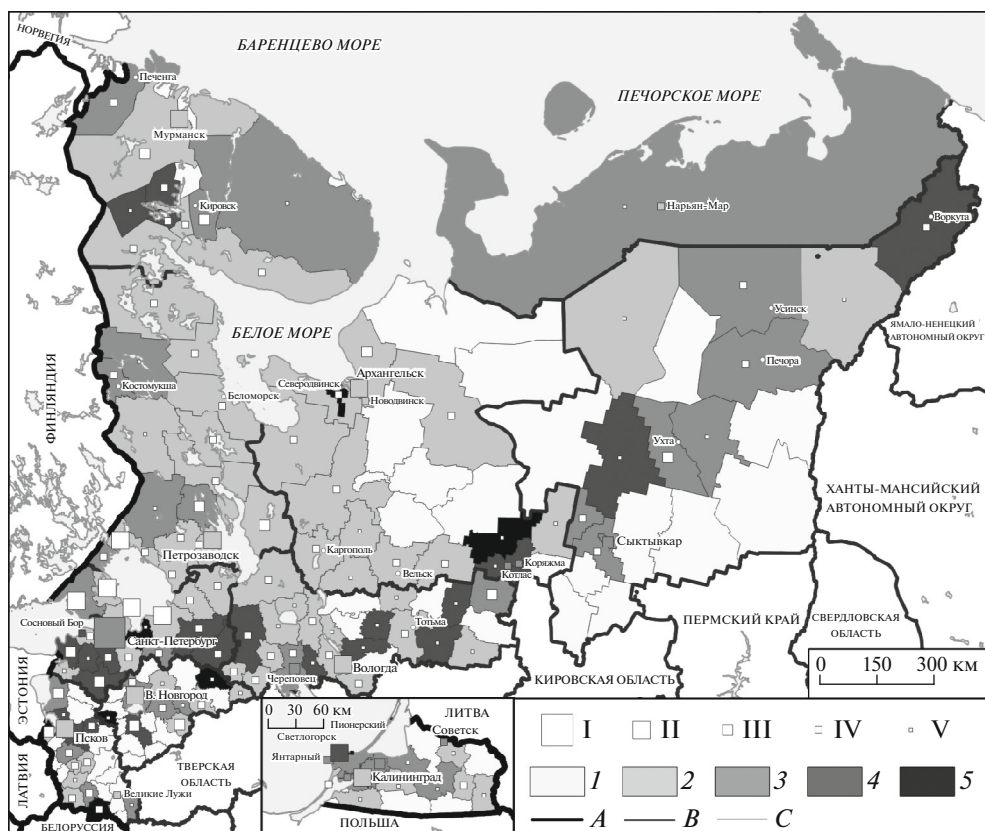


Рис. 2. Туристский поток на основе гостиничной статистики и средняя продолжительность пребывания в 2021 г. Средняя продолжительность пребывания, ночевки на 1 туриста (2021 г.): 1 – нет данных, 2 – менее 3, 3 – 3–5, 4 – 6–12, 5 – более 12. Туристский поток, количество размещенных лиц в КСР (тыс., 2021 г.): I – более 4000, II – 90–500, III – 30–89, IV – 5–29, V – менее 5. Границы: А – государственные, В – субъектов РФ, С – муниципальных районов, муниципальных и городских округов.

Fig. 2. Tourist flow based on hotel statistics and average length of stay in 2021. Average length of stay, overnight stays per 1 tourist (2021): 1 – no data, 2 – less than 3, 3 – 3–5, 4 – 6–12, 5 – more than 12. Tourist flow, number of persons accommodated in the collective accommodation establishments (thousand, 2021): I – more than 4000, II – 90–500, III – 30–89, IV – 5–29, V – less than 5. Borders: A – state, B – Russian Federation's regions, C – municipal districts, municipal and urban okrugs.

Карелия) и ряд др. Большинство районов Ленинградской области также имеют большую гостиничную емкость, так как обслуживают крупный турпоток из С.-Петербурга, ориентированный в основном на загородный отдых.

На третьем этапе исследования были рассмотрены такие показатели, как величина туристского потока в муниципальных образованиях регионов СЗФО на основе гостиничной статистики, а также средняя продолжительность пребывания в 2021 г. (рис. 2).

Самый большой турпоток наблюдается в С.-Петербурге – крупнейшем туристском центре международного масштаба на Северо-Западе. Наибольшее количество районов со значительной величиной турпотока (более 30 тыс.) сосредоточено вокруг С.-Петербурга. В его зону влияния, помимо западной и центральной частей Ленин-

градской области, попадают Гдовский (Псковская обл.) и Сортавальский (Республика Карелия) районы. В остальных регионах, как правило, выделяется от двух до четырех наиболее значимых туристских центров.

На представленной карте можно увидеть несколько лакун – районов, где гостиничная инфраструктура отсутствует или присутствует в незначительном количестве, которое не попадает в статистическое наблюдение. Это практически все районы на границе Псковской и Новгородской областей, российско-латвийское приграничье, центральная и северо-восточная часть Архангельской области и южная часть Республики Коми. В основном это периферийные сельские районы с редкой дорожной сетью.

Высокая средняя продолжительность пребывания туристов или отдыхающих (более 12 дней) характерна для районов, где расположены санатории и подобные лечебно-оздоровительные учреждения, также относящиеся к КСР. Выше среднего продолжительность пребывания в некоторых районах Ленинградской области и сопредельных с ней, так как на загородных базах отдыха часто снимается дом на неделю или близкий по протяженности срок, что отражается в статистике. Также повышенными значениями отличаются некоторые районы Севера, что связано, вероятно, с проживанием вахтовых рабочих.

На четвертом этапе работы была рассчитана туристская нагрузка (на 1 тыс. жителей) в муниципальных образованиях СЗФО (рис. 3).

Лидерами по туристской нагрузке являются следующие районы: Новоржевский (Псковская обл.), Волховский (Ленинградская обл.), Сортавальский, Пудожский и Беломорский (Республика Карелия), Вельский (Архангельская обл.). В целом можно заметить, что большинство районов Ленинградской области, несмотря на большую величину турпотока, не отличаются высокой туристской нагрузкой, а в крупных городах она более значительная, но ниже, чем в перечисленных выше районах.

На заключительном этапе исследования была разработана классификация районов СЗФО по объему турпотока и степени развитости инфраструктуры HoReCa (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее наглядно влияние пандемии COVID-19 на внутренний туризм в регионах России можно проследить, опираясь на статистику по состоянию туристской инфраструктуры и изменению величины турпотоков. Но таких работ в настоящее время проводится достаточно мало. В ходе исследования были отобраны шесть показателей, характеризующих объем туристского потока и степень развитости гостинично-ресторанной инфраструктуры HoReCa в 2021 г. Муниципальные образования Северо-Западного федерального округа были распределены по трем основным группам, отражающим высокий, средний и низкий уровень развития туристской сферы.

В районах и городах с наибольшим турпотоком, как правило, высокий уровень развития имеет также инфраструктура HoReCa (см. рис. 4). Исключение составляют Выборгский и Всеволожский районы Ленинградской области, где из-за близости к С.-Петербургу сфера общественного питания развита заметно хуже. В районах со средним турпотоком хуже развита инфраструктура HoReCa в пригородах крупных городов (С.-Петербург, Вологда, Череповец), лучше – в наиболее привлекательных для туристов районах (Гдовский, Пушкиногорский, Валдайский, Волховский, Пудожский, Беломорский районы).

В районах с небольшим турпотоком высокоразвитая инфраструктура HoReCa встречается редко: это или граничащие с более посещаемыми районами (Янтарный в Калининградской обл., Новоржевский район в Псковской обл.), или региональная столица (Нарьян-Мар). Наименее развитая инфраструктура HoReCa характерна для наиболее периферийных районов, либо для пригородов крупных городов. Районы со средней величиной турпотока и со среднеразвитой инфраструктурой HoReCa (в боль-

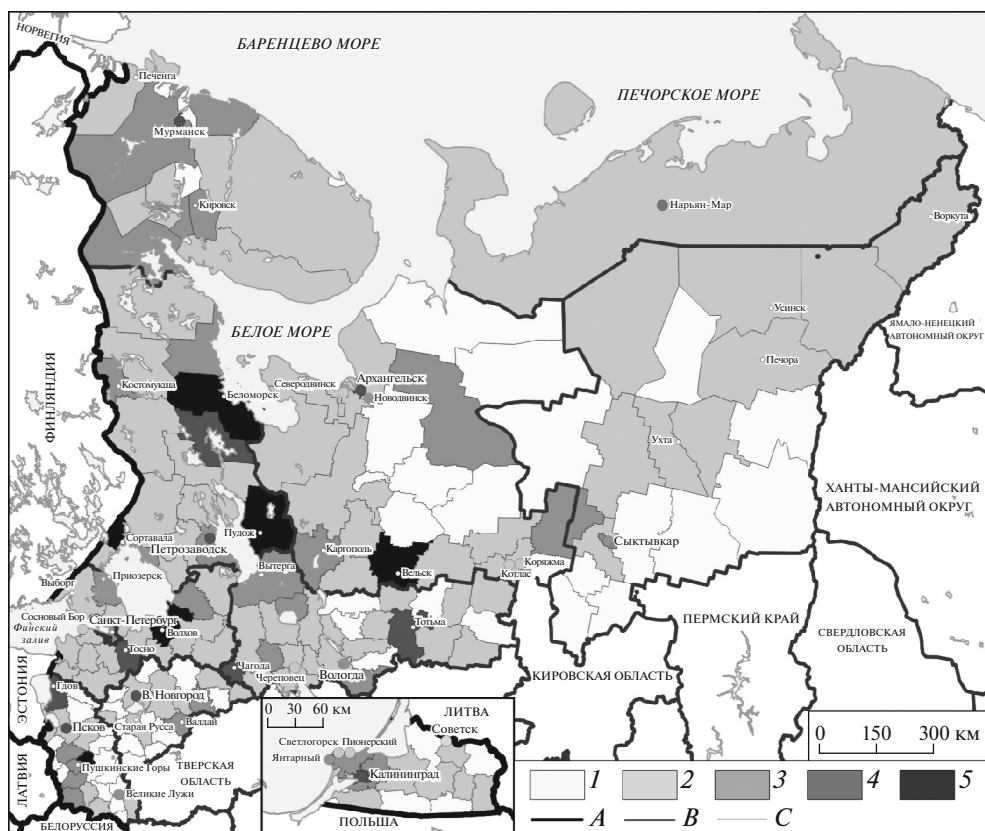


Рис. 3. Туристская нагрузка в расчете на 1 тыс. жителей в 2021 г. Туристская нагрузка, туристов на 1 тыс. жителей (2021 г.): 1 – нет данных, 2 – менее 30, 3 – 30–49, 4 – 50–70, 5 – более 70. Границы: А – государственные, В – субъектов РФ, С – муниципальных районов, муниципальных и городских округов.

Fig. 3. Tourist load per 1 thousand inhabitants in 2021. Tourist load, tourists per 1 thousand inhabitants (2021): 1—no data, 2—less than 30, 3—30–49, 4—50–70, 5—more than 70. Borders: А—state, В—Russian Federation’s regions, С—municipal districts, municipal and urban okrugs.

шинстве случаев за счет общепита) встречаются во всех регионах (кроме Ненецкого АО) – обычно через них проходят какие-либо значимые межрегиональные автодороги.

Нужно учесть, что туристская статистика отражает ситуацию на второй год пандемии COVID-19. Однако внутренний турпоток в СЗФО, как показало исследование, в 2021 г. даже немного превзошел уровень допандемийного 2019 г., и потому выявленные пространственные различия в 2021 г. можно отнести также и к периоду до начала пандемии. На региональном уровне лидерами по росту внутреннего турпотока с 2019 по 2021 гг. в СЗФО стали (см. табл.): Калининградская область (+47%), Республика Карелия (+28%) и Мурманская область (+27%). Наиболее вероятной причиной роста внутреннего турпотока в Калининградской области в 2021 г. стала плохая погода на черноморских курортах. В Карелии турпоток вырос за счет продолжения развития туристско-рекреационного кластера в Северном Приладожье (с центром в Сортавальском районе).

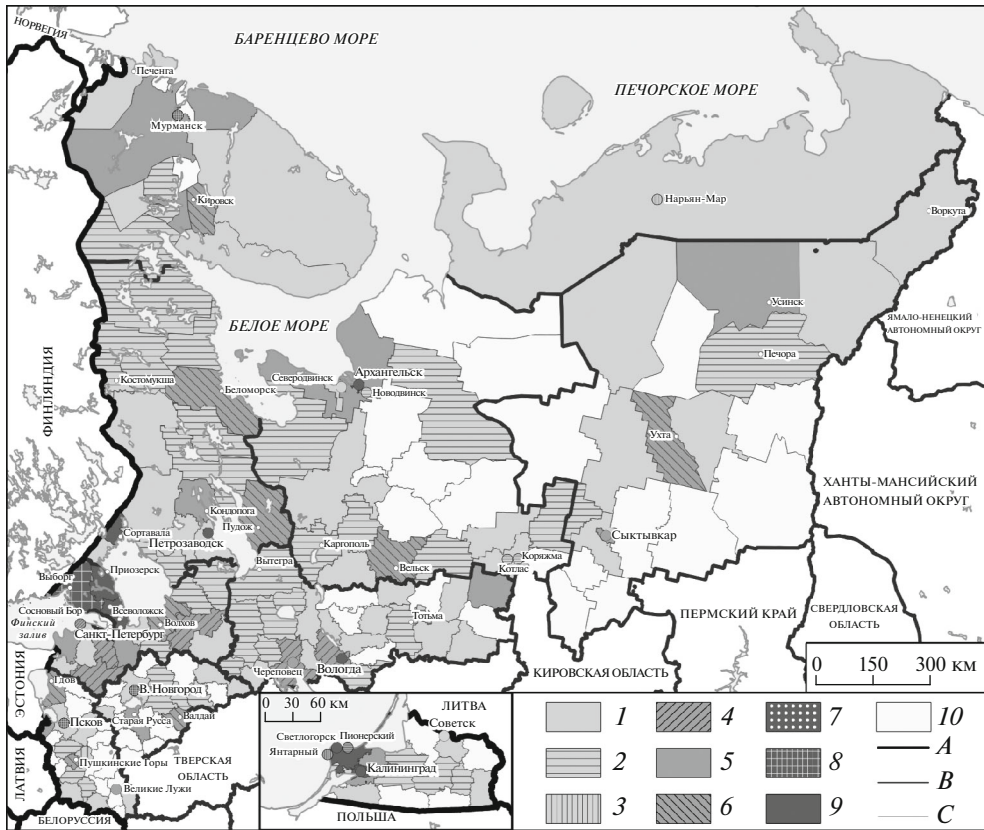


Рис. 4. Классификация районов по объему турпотока и степени развитости инфраструктуры HoReCa. Районы с турпотоком менее 20 тыс.: 1 – со слаборазвитой инфраструктурой HoReCa, 2 – со среднеразвитой инфраструктурой HoReCa, 3 – с наиболее развитой инфраструктурой HoReCa. Районы с турпотоком от 20 до 100 тыс.: 4 – со слаборазвитой инфраструктурой HoReCa, 5 – со среднеразвитой инфраструктурой HoReCa, 6 – с наиболее развитой инфраструктурой HoReCa. Районы с турпотоком более 100 тыс.: 7 – со слаборазвитой инфраструктурой HoReCa, 8 – со среднеразвитой инфраструктурой HoReCa, 9 – с наиболее развитой инфраструктурой HoReCa. 10 – неклассифицированные районы. Границы: А – государственные, В – субъектов РФ, С – муниципальных районов, муниципальных и городских округов.

Fig. 4. Classification of areas according to the volume of tourist flow and the degree of development of HoReCa infrastructure. Districts with a tourist flow of less than 20 thousand: 1—with an underdeveloped HoReCa infrastructure, 2—with a medium-developed HoReCa infrastructure, 3—with the most developed HoReCa infrastructure. Districts with a tourist flow from 20 to 100 thousand: 4—with an underdeveloped infrastructure of HoReCa, 5—with a medium-developed infrastructure of HoReCa, 6—with the most developed infrastructure of HoReCa. Districts with a tourist flow of more than 100 thousand: 7—with underdeveloped HoReCa infrastructure, 8—with medium-developed HoReCa infrastructure, 9—with the most developed HoReCa infrastructure. 10—unclassified areas. Borders: A—state, B—Russian Federation’s regions, C—municipal districts, municipal and urban okrugs.

Среди других субъектов СЗФО нужно отметить С.-Петербург и Ленинградскую область, где внутренний турпоток в 2021 г. также заметно превзошел уровень 2019 г. В остальных регионах СЗФО внутренний турпоток в 2021 г. или незначительно превысил уровень 2019 г., или же заметно подтянулся к нему после кризисного 2020 г. В ито-

ге внутренний туризм в СЗФО смог примерно на треть заместить въездной турпоток, сократившийся семикратно из-за ограничений в пересечении российской границы, связанные с пандемией COVID-19. Если в 2019 г. доля внутреннего турпотока в общем объеме туристского потока в СЗФО составляла 74.6%, то в 2021 г. она достигла 95.7%.

В проведенном исследовании впервые использована статистика прибытий и ночевок на уровне муниципальных образований, т.к. Росстат начал предоставлять ее на этом уровне только с 2021 г. Это позволило сравнивать по объему турпотока не только регионы страны, но и города и муниципальные районы. Одно из ограничений исследования было задано статистикой Росстата, который не предоставляет столько же данных, сколько зарубежная статистика по туризму. Второе ограничение связано с сеткой муниципальных районов, которая не дает возможности проследить, какие конкретно туристские дестинации являются наиболее привлекательными для туристов и отдыхающих.

Исследование показало, что, благодаря появлению официальной государственной статистики по туризму на уровне низовых административных единиц, могут быть расширены возможности российской географии туризма как научного направления. А именно, созданы предпосылки для развития географии туристских потоков, опирающейся на количественные методы исследования, в отличие от традиционной рекреационной географии, где господствует качественная оценка туристско-рекреационных ресурсов, современного состояния и перспектив развития туризма и рекреации в отдельных регионах России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2020 г. из-за пандемии COVID-19 произошло сокращение на 40% туристского потока в регионах Северо-Западного федерального округа. Однако внутренний турпоток уменьшился в намного меньшей степени (на 24.3%), в то время как въездной турпоток сократился в 7 раз. В 2021 г. произошел почти полуторакратный рост внутреннего турпотока в СЗФО, что позволило ему более чем на треть заместить сокращение въездного турпотока в первый год пандемии. Хотя по общему объему турпотока федеральный округ не вышел на допандемийный уровень (сокращение составило 13.6%), внутренний турпоток в 2021 г. на 10.9% превзошел уровень 2019 г. При этом, если в 2019 г. доля внутреннего турпотока в общем объеме туристского потока в СЗФО составляла 74.6%, то в 2021 г. она достигла 95.7%.

По сравнению с другими федеральными округами в 2021 г. СЗФО показал лучшую среди федеральных округов России динамику по приросту внутреннего турпотока относительно 2019 г. Основной вклад в этот прирост обеспечили С.-Петербург и Ленинградская область, Калининградская область и Республика Карелия. При этом, по объему сокращения иностранного турпотока СЗФО занимает второе место среди федеральных округов страны (в абсолютном выражении его опережает Центральный федеральный округ, а в относительном – Дальневосточный).

В результате проведенного исследования муниципальные образования Северо-Западного федерального округа по степени развитости туристской инфраструктуры и размеру турпотока в 2021 г. были распределены по трем основным группам. Картографический анализ, сопровождающий разработку классификации муниципальных районов по статистике Росстата, позволил увидеть внутрорегиональные различия по величине турпотока и развитости туристской инфраструктуры, которые не прослеживаются при анализе туристской статистики на региональном уровне.

В частности, в ходе исследования были выявлены туристские аномалии – районы, где объем турпотока не соответствует степени развития имеющейся гостинично-ресторанной инфраструктуры. Например, в Ленинградской области многие районы характеризуются недостаточным развитием общепита, а в Псковской области при сте-

пени развития гостинично-ресторанной инфраструктуры выше среднего во многих районах — недостаточным турпотоком. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при планировании развития туризма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Августенок К.Ю.* Проблемы развития гастрокультурного туризма в Республике Карелия // Вестник современных исследований. 2018. № 5.3 (20). С. 323–326.
2. *Андреева М.В., Крюкова И.В.* Проблемы и перспективы развития сельского туризма в Вологодской области // Вестник университета. 2020. № 11. С. 67–73. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2020-11-67-73>
3. База данных показателей муниципальных образований. Росстат. URL: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/bd_munst/munst.htm (дата обращения: 25.07.2022).
4. *Балабейкина О.А., Гаврилова К.С., Кузнецова Ю.А.* Религиозный туризм как составляющая брендинга Архангельской области // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2021. № 3 (73). С. 118–128. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.3.2021.73.008>
5. *Васильева Д.Э., Красильникова И.Н.* Геологические и геоморфологические памятники природы Псковской области как объекты туризма и рекреации // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2020. № 16. С. 49–54.
6. *Величкина А.В.* Проблемы развития туристской инфраструктуры региона (на примере Вологодской области) // Проблемы развития территории. 2013. № 4 (66). С. 40–48.
7. Виды туризма и география турпотоков в зеркале пандемии COVID-19 / Под ред. А.Г. Манакова. Псков: Псковский государственный университет, 2022. 214 с.
8. *Воеводская К.В., Мышлайцева С.Э.* Приоритетные виды туризма в Республике Коми // География и туризм. 2020. № 2. С. 78–82.
9. *Давыдова С.Г., Дружнова М.П.* Динамика развития туризма в муниципальных образованиях Новгородской области // Вестник Новгородского филиала РАНХиГС. 2016. Т. 5. № 2–2 (6). С. 9–19.
10. *Дементьев В.С., Баженова Т.С.* Динамика туристского потока в регионах Северо-Западного федерального округа в условиях COVID-19 // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 1. С. 3–11.
11. *Дмитрук Н.Г.* О развитии сельского туризма в муниципальных районах Новгородской области // Вестник Новгородского филиала РАНХиГС. 2018. Т. 7. № 1–1 (9). С. 116–124.
12. *Жагина С.Н., Светлосанов В.А., Низовцев В.А., Пахомова О.М.* Развитие и перспективы экологического туризма в Мурманской области и его связь с устойчивым развитием региона // Экологические системы и приборы. 2022. № 3. С. 3–8. <https://doi.org/10.25791/esip.3.2022.1287>
13. *Кондратьева С.В.* Вовлеченность региона в интеграционные процессы: проекты туризма (карельская практика) // Псковский регионологический журнал. 2021. № 1 (45). С. 62–76. <https://doi.org/10.37490/S221979310013150-8>
14. *Кондратьева С.В.* Программа приграничного сотрудничества как инструмент развития регионального туризма: опыт Республики Карелия // Псковский регионологический журнал. 2020. № 4 (44). С. 119–127. <https://doi.org/10.37490/S221979310010617-1>
15. *Кондратьева С.В.* Развитие туризма в регионах Европейского Севера // Арктика и Север. 2022. № 47. С. 164–187.
16. *Костюченко В.В., Костюченко М.О., Астанин Д.М.* Перспективы развития сельского туризма Вологодской области // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2–1 (116). С. 152–155. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.116.2.025>
17. *Лаврова Т.А.* Анализ экономического состояния индустрии туризма Российской Федерации в условиях распространения COVID-19 // Вестник национальной академии туризма. 2020. № 4. С. 10–13.
18. *Лебедева Ю.А.* Организация мониторинга качества туристских услуг на муниципальном уровне. Чебоксары: ИД “Среда”, 2020. 132 с.
19. *Леонидова Е.Г.* Туризм в России в условиях COVID-19: оценка экономического эффекта от стимулирования спроса для страны и регионов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2021. Т. 14. № 2. С. 59–74. <https://doi.org/10.15838/esc.2021.2.74.4>
20. *Манаков А.Г., Голомидова Е.С., Иванов И.А.* Оценка величины туристского потока в пределах трансграничных туристско-рекреационных регионов на Северо-Западном побережье России // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151. № 5. С. 18–31. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151518-31>

21. Манаков А.Г., Иванов И.А. Динамика туристского обмена России с соседними странами Северной Европы в 2004–2018 гг. // Псковский регионологический журнал. 2019. № 3 (39). С. 128–144.
22. Полухина А.Н. Анализ современного состояния внутреннего туризма в регионах России в период пандемии (по итогам исследования 2022 г.) // Инновационное развитие экономики. 2022. № 1–2 (67–68). С. 175–181.
<https://doi.org/10.51832/2223798420221-2175>
23. Потапов И.А. Возможности развития железнодорожного туризма в Архангельской области для отдыха выходного дня // Сервис в России и за рубежом. 2020. Т. 14. № 2 (89). С. 126–137.
<https://doi.org/10.24411/1995-042X-2020-10211>
24. Степанова С.В. Развитие туризма в приграничье: преимущества или ограничения? (Карельская практика) // Балтийский регион. 2019. Т. 11. № 2. С. 94–111.
<https://doi.org/10.5922/2079-8555-2019-2-6>
25. Степанова С.В. Территориальные диспропорции размещения инфраструктуры туризма в Республике Карелия // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. 2019. № 3 (91). С. 89–97.
<https://doi.org/10.24866/2311-2271/2019-3/89-97>
26. Теренина Н.К., Хохрин А.Г. Возможности развития этнографического туризма в Псковской области как приграничном регионе // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2019. № 14. С. 47–54.
27. Чингина Е.Н. Особенности развития конного туризма в Карелии // Вопросы педагогики. 2022. № 2–2. С. 210–213.
28. Янкевич Ю.Г. Направления развития экологического туризма в Санкт-Петербурге на современном этапе // XXV юбилейные Царскосельские чтения. Материалы международной научной конференции / Под общей редакцией С.Г. Еремеева. СПб.,: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2021. С. 205–210.
29. Altuntas F., Gok M.S. The effect of COVID-19 pandemic on domestic tourism: A DEMATEL method analysis on quarantine decisions // International Journal of Hospitality Management. 2021. 92. doi: 10.1016/j.ijhm.2020.102719
30. Binbaşoğlu H. A shift in attitudes and priorities of Turkish domestic tourists as a result of the COVID-19 pandemic // Studia Periegetica. 2022. No. 1 (37). P. 87–106.
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.8580>
31. Hussain A., Fusté-Forné F. Post-Pandemic Recovery: A Case of Domestic Tourism in Akaroa (South Island, New Zealand) // World. 2021. No. 2(1). P. 127–138.
<https://doi.org/10.3390/world2010009>
32. Ivanov I.A., Golomidova E.S., Terenina N.K. Influence of the COVID-19 Pandemic on the Change in Volume and Spatial Structure of the Tourist Flow in Finland and Estonia in 2020 // Regional Research of Russia. 2021. V. 11. № 3. P. 361–366.
<https://doi.org/10.1134/S2079970521030059>
33. Kapil Gurung. The outbreak of COVID-19 and its impact in South Korea's Tourism: A hope in Domestic Tourism // Journal of Applied Sciences in Travel and Hospitality. 2021. V. 4. № 1. P. 1–8.
<https://doi.org/10.31940/jasth.v4i1.2332>
34. Reitano A., Fazio M., Schirripa Spagnolo F., Karanasios N. COVID-19 Impact on the Tourism Industry: Short Holidays within National Borders // Symphonia Emerging Issues in Management. 2021. № 2. P. 85–98.
<https://doi.org/10.4468/2021.2.08reitano.fazio.schirripa.karanasios>
35. Stepanova S.V. The Northern Ladoga region as a prospective tourist destination in the Russian-Finnish borderland: Historical, cultural, ecological and economic aspects // Geographia Polonica. 2019. V. 92. Is. 4. P. 409–428.
<https://doi.org/10.7163/Gpol.0156>

Domestic Tourism in the NWFDMunicipalities: Statistical Estimations and the Impact of the COVID-19 Pandemic

I. A. Ivanov¹*, T. V. Vasilyeva¹, I. N. Krasilnikova¹***, and A. G. Manakov¹******

¹*Pskov State University, Pskov, Russia*

*E-mail: ii60@bk.ru

**E-mail: tatyana_korotche@mail.ru

***E-mail: mulia777@mail.ru

****E-mail: region-psk@yandex.ru

In the geography of tourism, a direction of research on the study of the dynamics and direction of tourist flows is currently rapidly developing, which is based on official statistics at the level of states, regions and lower administrative units. In 2022, Rosstat for the first time pro-

vided statistics on arrivals and overnight stays in the municipalities of the country, which allowed the authors of the article to classify them according to these indicators for 2021 in the Northwestern Federal District. The classification of municipalities was based on six indicators characterizing the volume of the tourist flow and the degree of development of the hotel and restaurant infrastructure. Due to the COVID-19 pandemic, the Northwestern Federal District experienced a significant reduction in tourist flow in 2020. However, against the backdrop of a seven-fold decrease in inbound tourist flow, domestic tourist flow decreased only by a quarter. At the same time, already in 2021, the federal district saw an almost 1.5-fold increase in domestic tourist flow, which allowed it to replace the decrease in inbound tourist flow in the first year of the pandemic by more than a third. The cartographic analysis accompanying the development of the classification of municipal districts made it possible to see intra-regional differences in the size of the tourist flow and the development of tourist infrastructure, which are not traced when analyzing tourism statistics at the regional level. Thus, in the course of the study, a number of tourist anomalies within the regions were identified, when the volume of the tourist flow does not correspond to the degree of development of the existing hotel and restaurant infrastructure. The results of the study can be used in planning the development of tourism.

Keywords: COVID-19, volume of tourist flow, domestic tourism, hotel and restaurant infrastructure, collective accommodation facilities

REFERENCES

1. Avgustenok K.Yu. Problemy razvitiya gastrokul'turnogo turizma v Respublike Kareliya // Vestnik sovremennykh issledovaniy. 2018. № 5.3 (20). S. 323–326.
2. Andreeva M.V., Kryukova I.V. Problemy i perspektivy razvitiya sel'skogo turizma v Vologodskoj oblasti // Vestnik universiteta. 2020. № 11. S. 67–73. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2020-11-67-73>
3. Baza dannykh pokazatelej municipal'nyh obrazovaniy. Rosstat. URL: https://www.gks.ru/free_doc/new_site/bd_munst/munst.htm (data obrashheniya: 25.07.2022).
4. Balabejkina O.A., Gavrilova K.S., Kuznecova Yu.A. Religioznyy turizm kak sostavlyayushhaya brendinga Arxangel'skoj oblasti // Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka. 2021. № 3 (73). S. 118–128. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.3.2021.73.008>
5. Vasil'eva D.E., Krasil'nikova I.N. Geologicheskie i geomorfologicheskie pamyatniki prirody Pskovskoy oblasti kak ob'ekty turizma i rekreacii // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki. 2020. № 16. S. 49–54.
6. Velichkina A.V. Problemy razvitiya turistskoj infrastruktury regiona (na primere Vologodskoj oblasti) // Problemy razvitiya territorii. 2013. № 4 (66). S. 40–48.
7. Vidy turizma i geografiya turpotokov v zerkale pandemii COVID-19 / Pod red. A.G. Manakova. Pskov: Pskovskij gosudarstvennyy universitet, 2022. 214 s.
8. Voevodskaya K.V., Myshlyavceva S.E. Prioritetnye vidy turizma v Respublike Komi // Geografiya i turizm. 2020. № 2. S. 78–82.
9. Davydova S.G., Druzhnova M.P. Dinamika razvitiya turizma v municipal'nyh obrazovaniyakh Novgorodskoj oblasti // Vestnik Novgorodskogo filiala RANXiGS. 2016. T. 5. № 2–2 (6). S. 9–19.
10. Dement'ev V.S., Bazhenova T.S. Dinamika turistskogo potoka v regionax Severo-Zapadnogo federal'nogo okruga v usloviyax COVID-19 // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki. 2022. T. 15. № 1. S. 3–11.
11. Dmitruk N.G. O razvitii sel'skogo turizma v municipal'nyh rajonax Novgorodskoj oblasti // Vestnik Novgorodskogo filiala RANXiGS. 2018. T. 7. № 1–1 (9). S. 116–124.
12. Zhagina S.N., Svetlosanov V.A., Nizovcev V.A., Paxomova O.M. Razvitie i perspektivy ekologicheskogo turizma v Murmanskoy oblasti i ego svyaz' s ustojchivym razvitiem regiona // Ekologicheskie sistemy i pribory. 2022. № 3. S. 3–8. doi: 10.25791/esip.3.2022.1287
13. Kondrat'eva S.V. Vovlechnennost' regiona v integracionnye processy: proekty turizma (karel'skaya praktika) // Pskovskij regionologicheskij zhurnal. 2021. № 1 (45). S. 62–76. doi: 10.37490/S221979310013150-8
14. Kondrat'eva S.V. Programma prigranichnogo sotrudnichestva kak instrument razvitiya regional'nogo turizma: opyt Respubliki Kareliya // Pskovskij regionologicheskij zhurnal. 2020. № 4 (44). S. 119–127. <https://doi.org/10.37490/S221979310010617-1>
15. Kondrat'eva S.V. Razvitie turizma v regionah Evropejskogo Severa // Arktika i Sever. 2022. № 47. S. 164–187.

16. Kostyuchenko V.V., Kostyuchenko M.O., Astanin D.M. Perspektivy razvitiya sel'skogo turizma Vologodskoj oblasti // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2022. № 2–1 (116). S. 152–155.
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.116.2.025>
17. Lavrova T.A. Analiz ekonomicheskogo sostoyaniya industrii turizma Rossijskoj Federacii v usloviyax rasprostraneniya COVID-19 // *Vestnik nacional'noj akademii turizma*. 2020. № 4. S. 10–13.
18. Lebedeva Yu.A. Organizaciya monitoringa kachestva turistskix uslug na municipal'nom urovne. *Cheboksary: ID "Sreda"*, 2020. 132 s.
19. Leonidova E.G. Turizm v Rossii v usloviyax COVID-19: ocenka ekonomicheskogo effekta ot stimulirovaniya sprosya dlya strany i regionov // *Ekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz*. 2021. T. 14. № 2. S. 59–74.
<https://doi.org/10.15838/esc.2021.2.74.4>
20. Manakov A.G., Golomidova E.S., Ivanov I.A. Ocenka velichiny turistskogo potoka v predelax transgranichnyh turistsko-rekreacionnyh regionov na Severo-Zapadnom porubezh'e Rossii // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva*. 2019. T. 151. № 5. S. 18–31.
<https://doi.org/10.31857/S0869-6071151518-31>
21. Manakov A.G., Ivanov I.A. Dinamika turistskogo obmena Rossii s sosednimi stranami Severnoy Evropy v 2004–2018 gg. // *Pskovskij regionologicheskij zhurnal*. 2019. № 3 (39). S. 128–144.
22. Poluxina A.N. Analiz sovremennogo sostoyaniya vnutrennego turizma v regionax Rossii v period pandemii (po itogam issledovaniya 2022 g.) // *Innovacionnoe razvitie ekonomiki*. 2022. № 1–2 (67–68). S. 175–181.
<https://doi.org/10.51832/2223798420221-2175>
23. Potapov I.A. Vozmozhnosti razvitiya zheleznodorozhnogo turizma v Arxangel'skoj oblasti dlya ot-dyxa vyhodnogo dnya // *Servis v Rossii i za rubezhom*. 2020. T. 14. № 2 (89). S. 126–137.
<https://doi.org/10.24411/1995-042X-2020-10211>
24. Stepanova S.V. Razvitie turizma v prigranich'e: preimushhestva ili ogranicheniya? (Karel'skaya praktika) // *Baltijskij region*. 2019. T. 11, № 2. S. 94–111.
<https://doi.org/10.5922/2079-8555-2019-2-6>
25. Stepanova S.V. Territorial'nye disproporcii razmeshheniya infrastruktury turizma v Respublike Kareliya // *Izvestiya Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Ekonomika i upravlenie*. 2019. № 3 (91). S. 89–97.
<https://doi.org/10.24866/2311-2271/2019-3/89-97>
26. Terenina N.K., Xoxrin A.G. Vozmozhnosti razvitiya etnograficheskogo turizma v Pskovskoj oblasti kak prigranichnom regione // *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki*. 2019. № 14. S. 47–54.
27. Chingina E.N. Osobennosti razvitiya konnogo turizma v Karelii // *Voprosy pedagogiki*. 2022. № 2–2. S. 210–213.
28. Yankevich Yu.G. Napravleniya razvitiya ekologicheskogo turizma v Sankt-Peterburge na sovremennom etape // *XXV yubilejnye Czarskosel'skie chteniya. Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii / Pod obshhej redakciej S.G. Eremeeva*. SPb.: LGU im. A.S. Pushkina, 2021. S. 205–210.
29. Altuntas F., Gok M.S. The effect of COVID-19 pandemic on domestic tourism: A DEMATEL method analysis on quarantine decisions // *International Journal of Hospitality Management*. 2021. 92.
<https://doi.org/10.1016%2Fj.ijhm.2020.102719>
30. Binbaşoğlu H. A shift in attitudes and priorities of Turkish domestic tourists as a result of the COVID-19 pandemic // *Studia Periegetica*. 2022. № 1 (37). P. 87–106.
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.8580>
31. Hussain A., Fusté-Forné F. Post-Pandemic Recovery: A Case of Domestic Tourism in Akaroa (South Island, New Zealand) // *World*. 2021. № 2(1). P. 127–138.
<https://doi.org/10.3390/world2010009>
32. Ivanov I.A., Golomidova E.S., Terenina N.K. Influence of the COVID-19 Pandemic on the Change in Volume and Spatial Structure of the Tourist Flow in Finland and Estonia in 2020 // *Regional Research of Russia*. 2021. V. 11. № 3. P. 361–366.
<https://doi.org/10.1134/S2079970521030059>
33. Kamil Gurung. The outbreak of COVID-19 and its impact in South Korea's Tourism: A hope in Domestic Tourism // *Journal of Applied Sciences in Travel and Hospitality*. 2021. V. 4. № 1. P. 1–8.
<https://doi.org/10.31940/jasth.v4i1.2332>
34. Reitano A., Fazio M., Schirripa Spagnolo F., Karanasios N. COVID-19 Impact on the Tourism Industry: Short Holidays within National Borders // *Symphonya Emerging Issues in Management*. 2021. № 2. P. 85–98.
<https://doi.org/10.4468/2021.2.08reitano.fazio.schirripa.karanasios>
35. Stepanova S.V. The Northern Ladoga region as a prospective tourist destination in the Russian-Finnish borderland: Historical, cultural, ecological and economic aspects // *Geographia Polonica*. 2019. V. 92. Is. 4. P. 409–428.
<https://doi.org/10.7163/Gpol.0156>

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОРВАННЫХ ИЗЛУЧИН И ОБРАЗОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕНИЙ НА МЕАНДРИРУЮЩИХ РЕКАХ¹

© 2022 г. Р. С. Чалов^{a, *}, А. А. Куракова^{a, **}, С. Н. Рулева^{a, ***}

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: rschalov@mail.ru

**E-mail: a.a.kurakova@mail.ru

***E-mail: mnks1@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

Рассмотрены условия и причины формирования прорванных излучин, создающих одиночные разветвления на больших реках с меандрирующим руслом. Они возникают при спрямлении развитых и крутых излучин, достигших в процессе эволюции критических соотношений параметров ($l/L > 1.4–1.7$; здесь l – длина, L – шаг излучины), при которых утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла. Прорванные излучины характерны для рек, поймы которых в многоводную фазу режима затопляются глубоко и на длительное время. При этом чаще всего происходит перераспределение стока во вновь образовавшийся спрямляющий рукав, хотя старое русло продолжает функционировать. Однако во многих случаях в прорванных излучинах сохраняется большая доля стока воды в старом русле. Это происходит, если вновь образовавшийся спрямляющий рукав располагается за плечом коренного берега, который, оказывая на поток направляющее (в сторону старого русла) воздействие, способствует сохранению его многоводности. При этом русло нового рукава меандрирует, наследуя понижение ложбино-гривистого рельефа в шпоре излучины, выполняет наносоотсасывающую роль, вследствие чего остается мелководным. Если руслоформирующий расход воды проходит в пойменных бровках, прорванные излучины образуются в экстремально высокие половодья или паводки. При этом они существуют в течении 10–20 лет, пока старое русло (бывшая излучина) заполняется наносами и со временем отмирает, превращаясь в пойменное старичное озеро. Кратковременное существование разветвлений (в течении ряда лет) до отмирания старого русла возможно при спрямлении петлеобразных излучин вследствие встречного размыва берегов. В любом случае развитию прорванных излучин благоприятствует слив в старое русло осветленных вод с затопленной поймы. Наличие прорванных излучин, т.е. форм разветвления русла – фактор рассредоточения стока по рукавам, оказывающим существенное влияние на переформирования их русел, развитие излучин и условия управления русловыми процессами при водохозяйственном освоении рек.

Ключевые слова: излучины русла, спрямление излучин, прорванные излучины, разветвления, рассредоточение стока, старица, руслоформирующий расход, затопление поймы

DOI: 10.31857/S0869607122050020

ВВЕДЕНИЕ

Процессы меандрирования речных русел относятся к наиболее изученным и широко освещенным в литературе [1, 2, 4, 6, 8, 9, 11, 16–21], особенно с точки зрения динамики потока на излучинах, причин их формирования, продольного и поперечного

¹ Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (исходные материалы, формирование излучин) при финансовой поддержке РНФ (проект 18.17.00086П – полевые исследования, русловой анализ, прорванные излучины и рассредоточение стока) и РФФИ (проект № 20-35-90003\20 – размывы берегов).

смещения излучин. Вместе с тем вопросы спрямления излучин как завершающего этапа из развития обычно рассматриваются только в общем виде без учета многообразия условий, в которых оно происходит, формирования возникающих разветвлений русла, возникающего рассредоточения стока и дальнейшей эволюции староречья – бывшей излучины и спрямляющего ее рукава. При этом считается, что спрямление излучины осуществляется, если она приобретает петлеобразную конфигурацию и происходит встречный размыв берегов на ее крыльях, поток перемещается в новое русло – проран в шейке излучины, тогда как бывшая излучина отмирает, превращаясь в старичное понижение или озеро на пойме (старицу). Однако в реальной обстановке часто спрямляются излучины, имеющие сегментную форму, создавая разветвленное русло, в котором продолжают функционировать одновременно и старое русло – бывшая излучина, и спрямляющий его рукав (новое русло). Н.И. Маккавеев [6] назвал такие разветвления “отрезанными меандрами”, выделив два случая их дальнейшего развития: 1) перемещение главного течения реки в спрямляющий рукав, который углубляется и расширяется (происходит общий его размыв), тогда как старое русло становится маловодным рукавом или со временем заполняется наносами и отмирает, превращаясь в старичное озеро или широкую изогнутую ложбину на пойме, заканчивающуюся в нижней своей части заливом (курьей); 2) спрямляющий рукав, забирая на себя до 20–30% стока, не получает дальнейшего развития, меандрирует, вследствие чего его длина оказывается соизмеримой с длиной излучины русла (старого русла), которую он спрямляет, что способствует “консервации” сформировавшегося разветвления. Впоследствии такие излучины, превратившиеся в разветвления русла, были названы “прорванными” [7] и в качестве таковых вошли в морфодинамическую классификацию русел МГУ [13, 14]. В “типизации руслового процесса” ГГИ [5] образование прорванных излучин стало называться “незавершенным меандрированием”; при этом принимается, что процесс развития излучин должен завершаться спрямлением петли вследствие встречного размыва берегов на крыльях петлеобразной излучины, что и послужило причиной появления самого термина “незавершенное меандрирование”.

Вне зависимости от причин и условий образования прорванные излучины представляют собой, с одной стороны, определенную стадию развития извилистого русла [16], а, с другой, – русловое разветвление, сопровождающееся рассредоточением стока между образовавшимися рукавами, характеризующимися определенной автономностью их развития, связанной с неодинаковой водностью, различной кривизной их русел, расположением относительно коренных (ведущих) берегов или бортов долины, взаимодействием потоков при их разделении и слиянии рукавов, неодинаковым соотношением с пойменными потоками, возникающими при затоплении поймы. Острова, образующие прорванные излучины, представляют собой отчлененные от поймы части шпоры излучин, в отличие от островов типичных разветвлений, формирующихся при зарастании осередков. Однако причина спрямления сегментных излучин, образование и дальнейшее развитие прорванных излучин не рассматривается.

Задача исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, – рассмотреть условия формирования и особенности дальнейшей эволюции прорванных излучин, причины их относительной стабилизации, превращения в одну из разновидностей разветвленных русел или существование в течение ограниченного отрезка времени и последующее отмирание.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены материалы, полученные в ходе русловых исследований на средней Оби, Иртыше, Вычегде, Оке, других реках с меандрирующим руслом, на которых распространены прорванные излучины или они не формируются, а процесс

меандрировании завершается возникновением петлеобразных форм и их спрямлением благодаря встречному размыву берегов. При этом проводились съемки и промеры русла, четкая фиксация размываемых берегов и зон аккумуляции наносов, определялась структура потока, в том числе с использованием современной аппаратуры (доплеровских измерителей течения). Одновременно выполнялся ретроспективный анализ переформирований русел по сопоставлению разновременных карт рек (ранее они назывались лоцманскими), которые зафиксировали состояние русел на определенные временные срезы, топографических карт, планов русел, составленных изыскательскими партиями на водных путях, а также аэро- и космических снимков. Последние позволяют также по рельефу поймы и пойменных островов, возникших при спрямлении излучин, восстанавливать последовательный ход эволюции излучин и определять их параметры, при которых произошло спрямление. По топографическим картам и данным стереофотограмметрической обработки аэро- и космических снимков давались оценки пространственных изменений высотных отметок поверхности поймы, позволившие определить пути стока вод, затапливающих пойму. С этой же целью выполнялись анализ данных о водном режиме рек и расчеты руслоформирующих расходов воды. Это дало возможность соотнести половодные или паводковые разливы с формированием спрямляющих рукавов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Условием формирования прорванных излучин считается достижение излучинами в процессе развития критических значений параметров, при которых утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла, т.е. потери энергии потока вследствие увеличения длины русла и развития циркуляционных течений превышают рост живой силы (мощности) потока на изгибе русла, происходящего вследствие дифференциации скоростного поля [6, 15, 16]. Это соответствует, с одной стороны, приобретению излучиной развитой и тем более крутой сегментной формы (степень развитости $l/L > 1.4-1.7$, где l – длина, L – шаг излучины), с другой, глубокому затоплению в многоводную фазу водного режима пойменного сегмента (обычно в таких случаях при затопленной пойме наблюдается руслоформирующий расход воды верхнего интервала) [13], когда в пониженной тыловой его части сосредотачивается поток со скоростями, превышающими неразмываемые для слагающих пойму грунтов (рис. 1). Этому способствуют повышенные до 1.5 раз и более уклоны пойменного потока (по сравнению с русловым по излучине) и наличие залива в низовой части сегмента, в направлении которого происходит слив вод, затапливающих в половодье пойму.

Если спрямление сегментной излучины не происходит, излучина становится все более крутой и приобретает в процессе своего развития петлеобразную форму. Это может быть, как при незначительном и кратковременном ее затоплении, так и вследствие высокой противоэрозионной устойчивости грунта, плотности дернового покрова на пойме, залесенности или закустаренности ее поверхности. Именно поэтому формирование прорванных излучин не представляет собой массового явления, а спрямление русла происходит при значительном превышении излучинами критических значений параметров (степени развитости), когда их сегментная форма трансформируется в близкую к омеговидной, вытянутую поперек пояса меандрирования, обеспечивая существенное повышение уклона пойменного потока, пересекающего по прямой шпору между крыльями излучины.

На больших реках, на которых условия, необходимые для спрямления развитых и крутых сегментных излучин не соблюдаются, но степень развитости излучин существенно превышает критические значения $l/L \geq 1.7$ и излучины еще не приобрели петлеобразную форму, их спрямление иногда происходит не из-за встречного размыва берегов на крыльях, а вследствие размыва нового русла вдоль пониженной тыловой

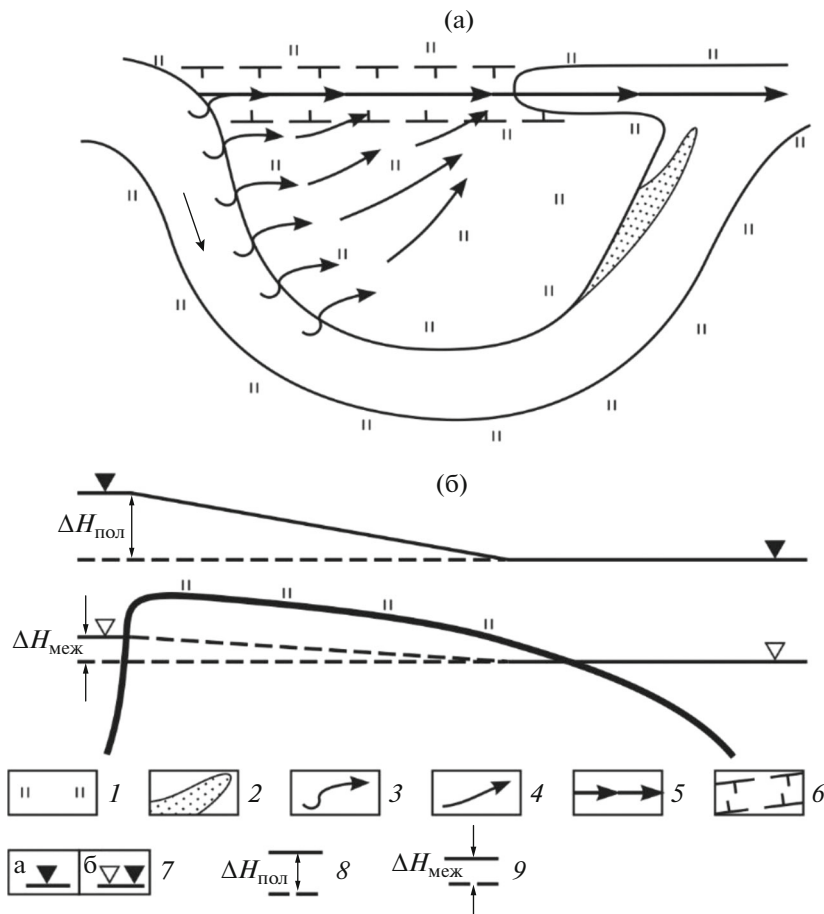


Рис. 1. Принципиальная схема условий спрямления крутой сегментной излучины и образование прорванной излучины: (а) план русла и пойменного сегмента, (б) продольный профиль поймы в тыловой части сегмента и водной поверхности в половодье и межень. 1 – Пойма; 2 – прирусловые отмели; 3 – перелив воды из русла в пойму; 4 – течения по затопленной пойме; 5 – течения в тыловой части поймы; 6 – понижения в тыловой части поймы; 7 – уровни воды: а – в половодье, б – в межень; превышение уровней водной поверхности в верхнем крыле излучины над нижним: 8 – в половодье, 9 – в межень.

Fig. 1. Schematic diagram of the conditions for straightening a steep segmental bend and the formation of a cut-off meander: (a) plan of the channel and floodplain segment, (b) longitudinal profile of the floodplain in the rear part of the segment and the water surface during high- and low-water. 1—Floodplain; 2—near-channel shallows; 3—overflow of water from the channel to the floodplain; 4—currents along the flooded floodplain; 5— currents in the rear part of the floodplain; 6—depressions in the rear part of the floodplain; 7—water levels: a—in high water, b—in low water; the excess of water surface levels in the upper wing of the bend over the lower one: 8—in high water, 9—in low water.

части пойменного сегмента (шпоры излучины), где в половодье устанавливается уклон между крыльями излучины, в 2–3 раза превышающий уклон в русле реки (при этом $l/L = 3-4$ и более). Однако существование таких разветвлений недолговечно, т.к. старое русло по бывшей крутой излучине довольно быстро заполняется наносами и отмирает. Так, на верхней Оби ниже устья р. Алея, где река отходит от левого корен-

ного берега и, перемещаясь в правобережную часть долины, формирует серию свободных излучин, активно смещающихся как в продольном, так и в поперечном направлениях (скорости размыва берегов свыше 10 м/год), степень развитости одной из них (Шадринской) в конце 1960-х годов составила $l/L > 3.0$. Поэтому в середине 1970-х гг. после экстремального высокого половодья начал формироваться спрямляющий рукав через ее шпору. В 1974 г., когда он образовался, его водность в межень составляла (по данным измерений) 39%, но уже в 80-е гг. в него перешло все течение реки (и судовой ход), т.к. старое русло было перекрыто массивным побочнем. Уже к 2000-м годам старое русло, просуществовав как рукав реки 15–20 лет, перестало существовать, будучи сверху занесенным наносами, заросло, а снизу превратилось в длинную и глубокую курью (залив), по которой сохранился водный подход к расположенному в вершине бывшей излучины населенному пункту (рис. 2). Такие же переформирования произошли при спрямлении Жениховской излучины верхней Оби непосредственно выше г. Барнаула и в нижнем течении р. Катунь (Инкинская излучина). Спрямляющий рукав на последней образовался также в 1974 г. во время экстремально высокого половодья, забрав из старого русла 31% расхода воды. Через 10 лет в старом русле (бывшей излучине) доля стока составляла 34%, а к 1993 г. оно полностью обмелело и сейчас заросло, превратившись в понижение на пойме с небольшим заливом в его нижней части.

Таким образом, образующиеся прорванные излучины при прохождении руслоформирующего расхода воды в пойменных бровках и возникающие при этом разветвления функционируют непродолжительное время и по мере обмеления и снижения водности старого русла (бывшей излучины) перестают существовать как формы разветвленного русла. Само же спрямление крутых излучин через шпору обычно происходит в экстремальные или близкие к ним высокие половодья, если при этом пойменный поток концентрируется в естественных понижениях (ложбинах) в тыловой части шпоры, вызывая их размыв. Так выше описанные спрямления крутых излучин на верхней Оби и нижней Катунь начались с образования первичных промоин между крыльями в очень высокое половодье 1974 г. Подтверждением роли выдающихся паводков в образовании прорванных излучин (спрямление крутых излучин через шпору) являются результаты детальных исследований русловых деформации меандрирующего русла р. Белой, показавшие, что “постепенное развитие излучин прерывается их внезапным спрямлением. В выдающийся паводок 2002 г. на участке из 11 излучин Белой три спрямились по размытой протоке через шпору излучины” [3, с. 60]. Именно такие спрямления излучин произошли на Оби и Катунь, но здесь они, к сожалению, не были зафиксированы и документально были отмечены лишь по происшествии нескольких лет после события.

Прорванные излучины как формы русловых разветвлений, определяющие русловой режим средних и больших реках, представлены чаще всего единичными образованиями среди свободных излучин, не составляя морфологически однородные участки. Тем не менее, они обуславливают рассредоточение стока, создавая местные осложнения для эксплуатации водных путей, способствуя формированию перекатов, “уходу” реки от населенных пунктов, обмелению водозаборов и т.д. Лишь в отдельных случаях, где две–три крутые сегментные излучины следуют одна за другой, спрямление одной из них может повлечь за собой аналогичное спрямление смежной, и тогда возникает короткий морфологически однородный участок прорванных излучин (не более 2–3-х), составляющий сопряженные разветвления (рис. 3). От таковых на реках с разветвленным руслом, они отличаются относительной прямолинейностью одних и большой кривизной других рукавов, сопрягающихся по правилу “восьмерки” [6, 10, 13, 15].

На реках, на которых руслоформирующий расход наблюдается до затопления поймы и спрямление сегментных излучин связано с экстремальными половодьями или па-

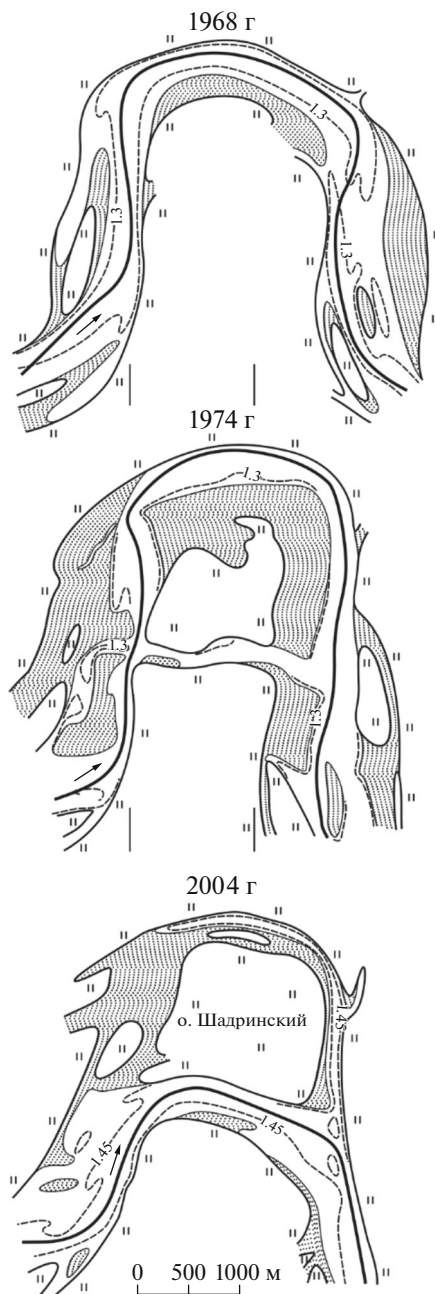


Рис. 2. Спрямирование Шадринской излучины на верхней Оби и отмирание старого русла.

Fig. 2. Straightening of the Shadrinskaya bend on the upper Ob and dying off of the old channel.

водками, образующиеся при этом прорванные излучины не только отличаются кратковременностью своего существования, но и, будучи единичными формами, встречаются на меандрирующих реках сравнительно редко. При прохождении руслоформирующих

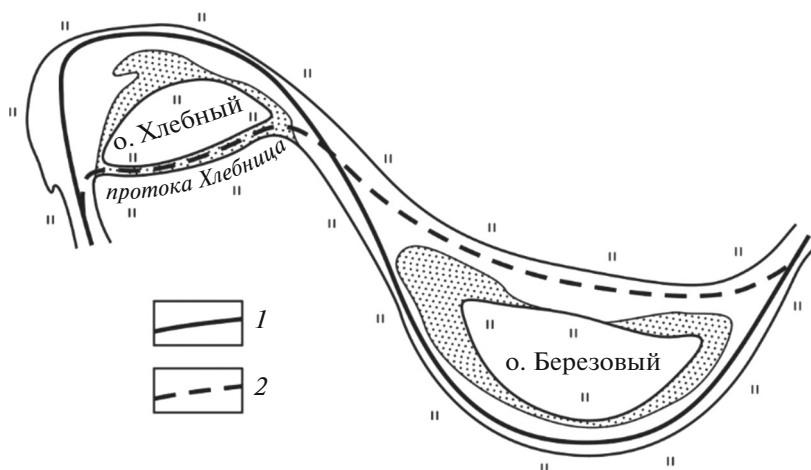


Рис. 3. Образование сопряженных разветвлений при спрямлении смежных крутых излучин. Положения стрежня потока: 1 – до спрямления излучин; 2 – после спрямления излучин.

Fig. 3. Formation of conjugate ramifications when straightening adjacent steep bends. Positions of the core of the flow: 1—before the straightening of the bends; 2—after straightening the bends.

расходов верхнего интервала (т.е. при глубоком и длительном затоплении поймы) прорванные излучины, особенно на больших реках, встречаются достаточно часто, хотя также в виде единичных форм. Так, на меандрирующей средней Оби между устьями рек Томи и Ваха имеется 15 прорванных излучин (11% длины участка). Большинство из них сформировалось ниже устья р. Кети, где руслоформирующий расход проходит при затопленной пойме [12]. При этом на всех излучинах развитие спрямляющего рукава сопровождается перераспределением в них расходов воды (обычно этот рукав становится судоходным). Однако, старое русло, остается достаточно многоводным (до 30–40% общего расхода воды), но, выполняя, как правило, наносотсасывающую роль, мелеет, в нем формируется перекаты с шахматным расположением побочной и извилистостью динамической оси потока. В свою очередь, русло спрямляющего рукава, не сосредотачивая в себе весь сток реки, меандрирует, образуя излучины, параметры которых соответствует его водности. Таково, например, развитие Нялинской прорванной излучины на р. Оби (рис. 4), в которой спрямляющий рукав (протока Соспас) забирает лишь немного больше половины общего расхода воды – 58%, и скорости размыва в нем могут превышать 10 м/год. Его формирование произошло при $l/L \approx 1.8$; излучины этого рукава (их шесть) наследуют ложбины на поверхности сегментно-гривистой поймы, вследствие чего его длина такая же, как и старого русла – Нялинской Оби, представленного двумя большими излучинами (его водность – 42%), вогнутые берега которых отступают со скоростью не более 3 м/год.

Влияние условий прохождения руслоформирующих расходов воды на развитие прорванных излучин наглядно прослеживается на нижнем Иртыше. Они часто встречаются ниже устья р. Тобола и вплоть до слияния с Обью, но отсутствуют выше по течению, где преобладают крутые сегментные и много петлеобразных излучин. В первом случае руслоформирующий расход соответствует затоплению поймы, во втором проходит в пойменных бровках [12, 13].

В большинстве же прорванных излучин, формирующихся при достаточно большей степени развития ($l/L > 1.7$), спрямляющий рукав характеризуется относительной прямолинейностью или образует одну пологую ($l/L \sim 1.1$) излучину. Это обеспечивает

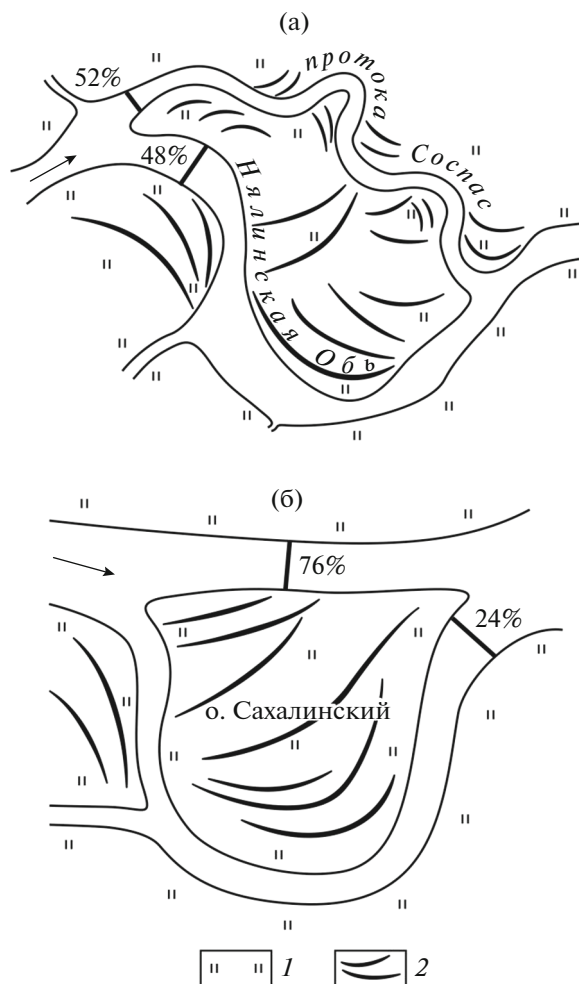


Рис. 4. Прорванные излучины средней Оби и рассредоточение них стока по рукавам (в %): (а) – Нялинская с меандрирующим спрямляющим рукавом, (б) – Сахалинская с прямолинейным спрямляющим рукавом. *I* – пойма, *2* – основные гривы на пойме.

Fig. 4. Cut-off meanders of the middle Ob, dispersal of their runoff along the branches (in %): (a)–Nyalinskaya with a meandering straightening arm, (b)–Sakhalinskaya with a straight straightening arm. *I*—floodplain, *2*—main manes on the floodplain.

быстрое перераспределение в него основного стока реки (до 75–80%), и в таком состоянии разветвление обычно консервируется на очень продолжительное время (многие десятки и даже сотни лет). В приведенном на рис. 4Б примере (Сахалинская прорванная излучина на средней Оби) левый прямой (судоходный) рукава забирает в половодье 76% расхода воды, его берега активно размываются (со скоростью 2–3.5 м/год, максимальной – до 6 м/год). Сохранению старого русла способствует слив в него осветленных вод с затопленной поймы, в т.ч. из крупной пойменной протоки. Если этого не происходит и образовавшееся старое русло оказывается вне основных пойменных потоков, прорванная излучина как форма разветвления существует относи-

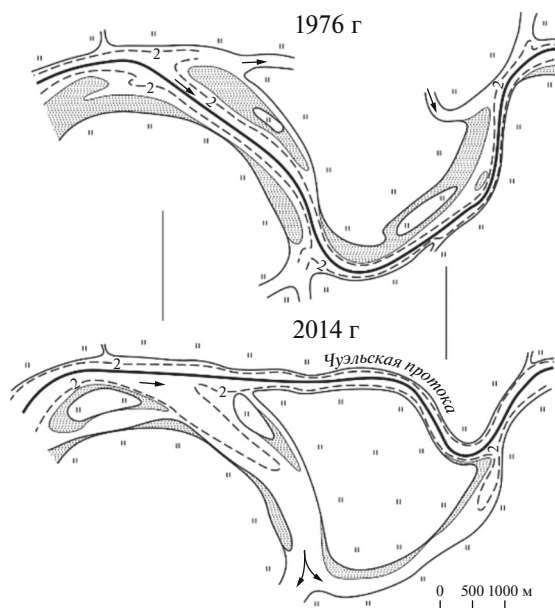


Рис. 5. Сопоставленные планы Чуэльской прорванной излучины Горной Оби.

Fig. 5. Compared plans of the Chuelskaya cut-off meander of the Gornaya Ob.

тельно непродолжительное время. На нижнем Иртыше, несмотря на прохождение руслоформирующего расхода воды при затопленной пойме, произошло отмирание старых русел на двух прорванных излучинах в течение 30–40 лет.

Прорванные излучины формируются также в рукавах раздвоенного русла крупнейших рек. На Горной Оби (правый рукав раздвоенного русла нижней Оби) прорванная излучина начала формироваться в середине XX столетия, и спрямляющий рукав (протока Чуэльская) уже существовал в 1976 г. (рис. 5), но был маловодным; главное течение Горной Оби (и судовой ход) располагались в правом, образующим кругую излучину рукаве ($l/L = 1.7$). В 20-е годы XXI века судовой ход был уже проложен по левому спрямляющему рукаву – протоке Чуэльской, водность которой составляет 43%, а берега в ней размываются со скоростью 1.1–1.2 м/год, обеспечивая увеличение пропускной способности рукава и последующий рост его водности. В правый, бывший судовой рукав уходит 57% расхода воды, но уже в его верхней части 42% стока отвлекается в правый рукав раздвоенного русла Горной Оби – протоку Сомутнельскую, и, таким образом, в нижней части его водность составляет всего 26%. Очевидно, что со временем Чуэльская протока превратится в основной по водности рукав Горной Оби.

В ряде случаев сохранение главного течения реки в старом русле и меньшая водность спрямляющего рукава связана с тем, что прорванная излучина формируется ниже выступа (плеча) коренного берега или изгиба долины реки, которые направляют поток в старое русло. Это характерно, например, для нижнего Иртыша, где таким образом образовалось шесть прорванных излучин, в которых истоки спрямляющих рукавов расположены за мысами коренного берега. Если спрямляющий рукав ниже мыса проходит вдоль коренного берега, русло его в целом относительно прямолинейное, с возможным формированием непосредственно ниже мыса вторичного разветвления, достаточно многоводное, но мелкое. В Надцынской прорванной излучине относительно водность такого рукава около 35%, в нем сформировались крупные побочни,

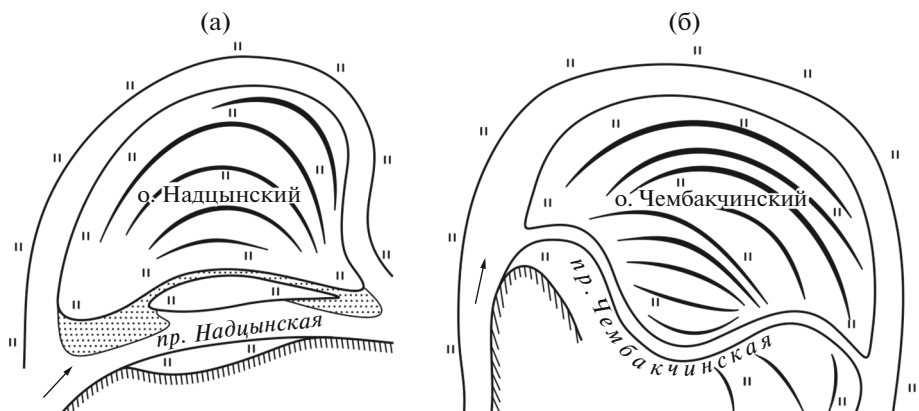


Рис. 6. Прорванные излучины нижнего Иртыша ниже мысов коренного берега. (а) – Надцынская вдоль коренного берега, (б) – Чембакчинская в пойменных берегах ниже мыса коренного берега.

Fig. 6. Cut-off meanders of the lower Irtysh below the capes of the bedrock coast. (a)—Nadsynskaya along the bedrock coast, (b)—Chembakchinskaya in the floodplain banks below the cape of the bedrock coast.

размывы берегов локальны; в то же время старое русло – левый рукав, забирает 65% стока воды, глубокий на всем протяжении, берега в нем размываются со скоростью в среднем 2.6 м/год (рис. 6а). Если ниже мыса, направляющего поток в старое русло, пойма со стороны спрямляющего рукава расширяется, сам рукав остается маловодным и мелким, меандрирует, образуя несколько излучин. Такова прорванная излучина на р. Иртыша, образующая Чембакчинские разветвление (рис. 6б), в котором по левому рукаву (излучине основного русла) проходит 87.5% расхода воды, скорости размыва составляют в среднем 2.5 м/год (максимальная – до 8.2 м/год), тогда как в спрямляющем – Чембакчинской протоке – 12.5%, темпы отступления берегов не превышают 2.8 м/год.

Относительно кратковременное существование разветвлений при спрямлении излучин возможно при встречном размыве берегов на крыльях петлеобразных излучин, следствием чего является образование прорана в пойменной перемычке между ними. Старое крутоизогнутое русло, имеющее форму петли, обычно быстро заполняется наносами, и его следы прослеживаются в рельефе поймы в виде старичных озер и заболоченных понижений, повторяющих форму бывших излучин русла. Такие временные разветвления периодически формируются в нижнем течении р. Иртыша, где они существуют как разветвления русла в течении 18–20 лет, постепенно заполняются наносами и в конце концов отмирают, а также на верхней Вычегде, Оке, Чулыме и других меандрирующих реках. В тех же случаях, когда вершина петлеобразной излучины подходит к коренному берегу и в нее во время половодья происходит слив осветленных вод с затопленной поймы, старорежье сохраняется более продолжительное время в виде рукава, но существенно уступающего по водности основному руслу. Таковы спрямления петлеобразной излучины на р. Иртыше у п. Такмык и у г. Тевриза (бывш. Кускунский поворот). Можно также ожидать долговременное существование разветвления, образовавшегося при спрямлении в 2019 г. вследствие встречного размыва берегов на крыльях Укинской излучины; ее вершина подходит к правому борту долины, и сюда, в нижнее крыло происходит слив полых вод с выклинивающейся правобережной поймы. Сейчас в проран уходит 67% расхода воды, скорости отступления берегов в нем достигают 20 м/год; соответственно 33% стока проходит в правом петлеобразном рукаве.

Аналогичные условия, способствующие длительному сосуществованию старого русла и спрямляющего более многоводного рукава, возникают у прорванных излучин, в том числе сформировавшихся на реках с прохождением руслоформирующего расхода воды в пойменных бровках: старое русло продолжает сохраняться достаточно многоводным вследствие слива в него потока с выклинивающейся поймы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Прорванные излучины на широкопойменных реках с меандрирующим руслом представляют собой специфические русловые разветвления, обуславливающие местное рассредоточение стока и, как следствие, вызывающие определенные осложнения при использовании речных ресурсов и транспортном освоении рек. При этом они не образуют морфологически однородные участки, встречаясь, как правило, в виде единичных форм среди извилистого в целом русла (пологих, развитых и крутых излучин). Развитие спрямляющих крутые излучины рукава происходит, если в процессе эволюции соотношение их параметров (длины l и L) превышает критические значения, соответствующие утрате гидравлической выгоды извилистой формы русла ($l/L > 1.4-1.7$). Условием этого являются глубокие и длительные затопления поймы в многоводную фазу водного режима, когда через сегмент, оконтуренный излучиной, проходит достаточно мощный поток, сосредотачивающийся в пониженной тыловой его части по линии наибольшего уклона водной поверхности (соответственно, более чем в 1.5 раза, превышающий уклон по руслу) в половодье.

2. В большинстве своем в прорванных излучинах большая часть стока воды перераспределяется в спрямляющий рукав. Старое русло (рукав — бывшая крутая излучина) при этом продолжает функционировать благодаря сливу в него осветленных вод с затопленной поймы. Соотношение водности обоих рукавов находится обычно в пределах 1 : 2—1 : 3 при относительной прямолинейности спрямляющего рукава. Однако нередко он формируется в условиях сложного ложбинно-гривистого рельефа поймы, наследуя ложбины различной ориентировки. В итоге спрямляющий рукав образует несколько излучин, его длина оказывается не меньшей, чем длина старого русла, а водность сопоставима со старым руслом.

3. Прорванные излучины, формирующиеся ниже крупных выступов коренных берегов или изгибов долины, отличаются сохранением большей части стока в старом русле. Спрямляющий рукав сравнительно маловоден, меандрирует, образуя несколько излучин, параметры которых соответствуют его водности; при прямолинейности и расположении вдоль коренного берега он забирает до 1/3 расхода воды, но, отходя от русла под углом, близким к прямому, отвлекает в себя основной сток наносов и является поэтому мелким. В обоих случаях излучина старого русла продолжает активного размываться, т.к. находится под направляющим воздействием на поток коренных берегов.

4. Если прорванная излучина формируется в условиях, когда руслоформирующий расход проходит в пойменных бровках (например, во время экстремально высокого половодья), старое русло функционирует в течение 15–20 лет и со временем превращается в старичное озеро или понижение в рельефе поймы с заливом (курьей) в нижней его части.

5. При спрямлении крутых петлеобразных излучин вследствие встречного размыва берегов на их крыльях и развитии через их шейку прорана, в который перемещается основной расход воды, старое русло и, соответственно, разветвление существует относительно недолго, пока не произойдет его заполнение наносами и отмирание. Лишь в случае расположения вершины такой излучины возле коренного берега возникающее разветвление может существовать долго благодаря сливу в старое русло вод с выклинивающейся поймы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Великанов М.А.* Образование речных излучин // Изв. АН СССР. Сер. геологич. 1950. № 3. С. 89–93.
2. *Завадский А.С.* Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования русел равнинных рек. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2001. 27 с.
3. *Каргаполова И.Н., Крыленко И.В.* Русловые процессы на полугорной реке (р. Белая, Западный Кавказ) (ст. 1. Горизонтальные деформации русла и сток воды как основной фактор) // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 1. С. 49–64.
4. *Кондратьев Н.Е.* Русловые процессы в меандрирующих руслах // Тр. ГГИ. 1954. Вып. 44 (98). С. 5–13.
5. *Кондратьев А.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
6. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозии в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 347 с.
7. *Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 1971. 116 с.
8. *Попов И.В.* О формах перемещения речных излучин // Тр. ГГИ. 1956. Вып. 56 (110). С. 36–57.
9. *Потапов М.В.* Винтовое движение жидкости в прямом открытом канале прямоугольного сечения // Поперечная циркуляция в открытом потоке и ее гидротехническое применение. М.: Сельхозиздат. 1936. С. 102–154.
10. Проектирование судовых ходов на свободных реках / Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. 262 с.
11. *Розовский И.Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН СССР. 1957. 188 с.
12. Русловой режим рек Северной Евразии. М.: Изд-во МГУ. 1994. 336 с.
13. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ. 1979. 232 с.
14. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 2004. 608 с.
15. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД. 2011. 960 с.
16. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.* Речные излучины. М.: Изд-во МГУ. 2004. 371 с.
17. *Callander R.A.* River meandering // Ann. Rev. Fluid. Mech. 1978. V. 10. P. 129–159.
18. *Davis W.M.* Meandering valleys and underfit rivers // Ann. Assoc. Am. Geogr. 1913. V. 3. P. 3–28.
19. *Fargue L.* La forme du lit des rivières a fond mobile. Paris: Gauthier – Villars. 1908. 187 p.
20. *Knighton A.D.* The meander problem // Geography. 1967. Pt. 2. № 275. P. 106–111.
21. *Yaag C.N.* On river meanders // J. Hydrology. 1971. V. 19. № 3. P. 231–233.

Cut-Off Meanders Formation and Braided Reaches Development on Meandering Rivers

R. S. Chalov¹, *, A. A. Kurakova¹, **, and S. N. Ruleva¹, ***

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: rschalov@mail.ru

**E-mail: a.a.kurakova@mail.ru

***E-mail: mnks1@yandex.ru

The conditions and reasons for the cut-off meanders formation, that create single braided reaches on large rivers with meandering channel, are considered. They appear when developed and steep bends, which have reached critical ratios of parameters in the process of their evolution ($l/L > 1.4–1.7$; l is the length, L is the step of the bend), are straightened. Cut-off bends are characteristic of rivers, where floodplains are flooded deeply and for a long time during high-water period. In this case, most often, the runoff is redistributed into the new straightening channel branch, although the old channel continues functioning. However, in many cases, in cut-off bends a larger part of water runoff remains in the old channel. This happens if the new straightening channel branch is located behind the reach of the bedrock bank, which exerts a directing (toward the old channel) effect on the flow; the new channel meanders and remains shallow. If the effective water discharge passes within floodplain edges, cut-off bends are formed during extremely high floods. At the same time, they exist for 10–20 years, while the old channel (the old bend) is filled with sediments and dies off, turning into a floodplain oxbow lake. The short-term existence of braided reaches (for a number of years) before the death of the old channel is possible when the loop-shaped bends are straightened due to the oncoming erosion of the banks. In any case, the development of cut-

off bends is favored by the discharge of clarified waters from the floodplain into the old channel. The presence of cut-off bends, i.e., forms of braided channel, is a factor in the dispersal of runoff along channel branches, which has a significant impact on their channel changes, development of bends and conditions for channel processes management while water management of rivers as a whole.

Keywords: channel meanders, cut-off meanders, braided channel reaches, runoff dispersal, abandoned channel (oxbow lake), effective water discharge, floodplain flooding

Acknowledgement. Completed under the plans of research work (GZ) of the Hydrology Department and the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of the Lomonosov Moscow State University (original data, formation of meanders) with the financial support of the Russian Science Foundation (project 18.17.00086P – field works, channel analysis, cut-off meanders and runoff dispersal) and Russian Foundation of Basic Research (project No. 20-35-90003\20).

REFERENCE

1. Velikanov M.A. Obrazovaniye rechnykh izluchinykh // Izv. AN SSSR. Ser. geologich. 1950. № 3. S. 89–93.
2. Zavadskiy A.S. Gidrologo-morfologicheskii analiz svobodnogo meandrirovaniya rusel ravninnykh rek. Avtoref, dis. ... kand. geogr. nauk. M.: MGU. 2001. 27 s.
3. Kargapolova I.N., Krylenko I.V. Ruslovye protsessy na polugornoi reke (r. Belay, Zapadnyi Kavkaz) (st. 1. Gorizontallye deformatsii rusla i stok vody kak osnovnoi faktor) // Geomorfologiya. 2022. T. 53. № 1. S. 49–64.
4. Kondrat'ev N.E. Ruslovye protsessy v meandrirovannykh rekakh // Tr. GGI. 1954. Vyp. 44 (98). S. 5–13.
6. Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snizhenko B.F. Osnove gidromorfologicheskoi teorii ruslovoogo protsesssa. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 272 s.
7. Makkaveev N.I. Ruslo reki i erzia v ee basstine. M.: Izd-vo AN SSSR. 1955. 347 s.
8. Makkaveev N.I. Stok i ruslovye protsessy. M.: Izd-vj MGU. 1971. 116 s.
9. Potapov M.V. Vintovoe dvizhenie zhidkosti v pryamom otkrytom rusle i ee gidrotehnicheskoe primeneniye / M.: Selhozizdat. 1936. S. 102–154.
10. Proektirovaniye sudovykh hodov na svobodnykh rekakh / Tr. CNIIEVT. 1964. Vyp. 36. 262 s.
11. Rozovskii I.L. Dvizheniye vody na povorote onkrytogo rusla. Kiev: Izd-vo AN USSR. 1957. 188 s.
12. Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii. M.: Izd-vo MGU. 1994. 336 s.
13. Chalov R.S. Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov. M.: Izd-vo MGU. 1979. 232 s.
14. Chalov R.S. Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika. T. 1. Ruslovye protsessy: formy, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel. M.: Izd-vo LKI. 2004. 608 s.
15. Chalov R.S. Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND. 2011. 960 s.
16. Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Panin A.V. Rechnye izluchiny. M.: Izd-vj MGU. 2004. 371 s.
17. Callander R.A. River meandering // Ann. Rev. Fluid. Mech. 1978. V. 10. P. 129–159.
18. Davis W.M. Meandering valleys and underfit rivers // Ann. Assoc. Am. Geogr. 1913. Vol 3. P. 3–28.
19. Fargue L. La forme du lit des rivières a fond mobile. Paris: Gauthier – Villars. 1908. 187 p.
20. Knighton A.D. The meander problem // Geography. 1967. Pt. 2. № 275. P. 106–111.
21. Yaugh C.N. On river meanders // J. Hydrology. 1971. Vol. 19. № 3. P. 231–233.

ВОДНАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВ В БАССЕЙНАХ КРУПНЕЙШИХ РЕК СИБИРИ

© 2022 г. А. С. Цыпленков^а *, С. Р. Чалов^а **, Г. Л. Шинкарева^а, ***

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: atsyplenkov@gmail.com

**E-mail: srchalov@geogr.msu.ru

***E-mail: galina.shinkareva@gmail.com

Поступила в редакцию 02.06.2022 г.

После доработки 05.07.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

На основе применения модели универсальной эрозии почв RUSLE рассчитаны параметры дождевой эрозии крупных речных бассейнов Российской Федерации (рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка, Колыма) на основе цифровой модели рельефа максимально доступного разрешения ($\approx 90 \times 90$ м). Результаты сопоставлены с существующими глобальными оценками и прежними исследованиями для территории России. Сделан вывод о высокой неопределенности мелкомасштабных оценок эрозии, выполненных в субконтинентальном масштабе, что объясняется высокой чувствительностью RUSLE к параметризации длины и крутизны склонов. В субмеридиональном направлении для всех бассейнов отмечается увеличение эрозии с севера на юг, соответствующее общему усилению сельскохозяйственного использования земель и повышению расчлененности рельефа. На основе сравнения со стоком наносов в замыкающих створах исследуемых рек сделан вывод об исключительно аккумулярующем режиме рассматриваемых водосборов: более 90% продуктов эрозионного смыва не достигает устьевых створов рек.

Ключевые слова: эрозия почв, универсальное уравнение эрозии, Арктика, сток наносов

DOI: 10.31857/S0869607122050093

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почв и формирование стока наносов подчиняется зональным гидролого-географическим закономерностям [15]. Современные оценки, выполненные в разрешении 250×250 м, свидетельствуют о продолжающемся глобальном увеличении интенсивности эрозии в мире [38], связанным с расширением площадей выращивания сельскохозяйственных культур. В период с 2001 по 2013 отмечается увеличение на 13% объемов выращивания наиболее распространенных зерновых культур [31], что отвечает потребностям увеличивающегося населения Земли и достигается исключительно за счет совершенств технологий и системы применения удобрений. Увеличение площадей сельскохозяйственных земель на 16–17% (279 млн га) за период с 1985 по 2013 [38, 52] полностью нивелируется потерями земель от эрозии, которые оценивают в 400 млрд долларов США в год [28]. Наиболее серьезная деградация земель наблюдается в прилегающих к Сахаре частях Африки, Южной Америке и Юго-Восточной Азии.

Изменения экономики землепользования в Российской Федерации, произошедшие после распада СССР, привели к трансформации эрозионно-руслowych систем [89]. Продолжающееся развитие горнодобывающей деятельности, особенно на севе-

ро-востоке страны, и трансформация пашни в другие виды сельскохозяйственных угодий или перевод ее в земли других категорий (несельскохозяйственного использования) в пределах целого ряда территорий является наиболее мощным фактором изменения интенсивности эрозионных процессов. В это же время существенно усилилась динамика природных факторов, прежде всего, климатических, что не могло не сказаться на развитии эрозии на склонах и на взаимосвязях этих факторов с русловым звеном речного бассейна. Наиболее значительные изменения почвенно-климатических условий талой эрозии, вызвавшие существенное снижение интенсивности смыва, особенно в лесостепной и степной зонах [8], отмечаются на Европейской территории России. Основной причиной уменьшения темпов смыва черноземов явилось сокращение стока воды со склонов в период снеготаяния, дополненное возможной сменой в структуре севооборота в сторону некоторого увеличения доли многолетних трав, а также противоэрозионными мероприятиями [9]. При этом во многих системах нарушения на водосборе проявляются неоднозначно: речных долинах, нарушенных россыпными месторождениями, основным фактором поступления материала является активизация русловых деформаций и сбросы сточных вод [22, 72].

Большинство существующих моделей водной эрозии были разработаны для сельскохозяйственных земель, расположенных в средних широтах Северной Америки и Европы, где природные условия (в первую очередь климат, рельеф и почвы) и степень антропогенного пресса существенно отличаются от тех, что типичны для горных регионов. Предыдущие исследования влияния крутизны склона на процессы эрозии показали, что уравнения, используемые в эмпирических моделях, особенно основанных на универсальном уравнении эрозии почв (RUSLE) [75], неприменимы для мелкомасштабных оценок эрозии [58]. В областях со сложным рельефом, которые встречаются в верховьях речных водосборов, основная проблема заключается в выделении склоновых сегментов, для которых необходимо вести расчет. Интеграция моделей в геоинформационные системы (ГИС) частично решила эту проблему за счет возможности использовать алгоритмы расчета линий тока по цифровым моделям рельефа (ЦМР). Таким образом, за счет “устранения региональных ограничений” возможно использовать RUSLE для различных ландшафтно-климатических условий [32].

На данный момент RUSLE является наиболее широко используемой моделью эрозии почв [16, 63], причем для различных пространственных масштабов: от стоковых площадок [86] и речных бассейнов [35, 40, 50] до континентов [39]. Существующая невозможность сравнения результатов расчетов для крупных территорий с фактическими наблюдениями, определяет необходимость использования результатов калибровки параметров модели, полученных по экспериментальным данным. В то же время чувствительность модели к разным входным данным, сопоставимость расчетов с оценками стока наносов для замыкающих створов речных бассейнов – актуальная задача, решение которой стало возможно в настоящее время. Отработка параметров эрозионных моделей [16, 89] позволяет выполнить оценку эрозионных процессов для крупных речных бассейнов на основе использования ГИС-технологий.

Процессы эрозии почв и последующего транспорта наносов в данной работе рассматривались в пределах эрозионно-русловых систем (ЭРС), представляющих совокупность форм рельефа и процессов, обусловленных воздействием водных потоков на поверхность Земли [32, с. 13]. В качестве модельных бассейнов выбраны крупнейшие реки Сибири (рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма). Существующие оценки эрозии почв для этих территорий выполнены либо относительно давно и в мелком масштабе [15, 19, 89], либо используют другие модели водной эрозии [26]. Целью данной работы является актуальная оценка эрозии для крупных речных бассейнов Сибири на основе ЦМР высокого разрешения (90 м). Частными задачами работы стала верификация результатов расчета на основе вариации входных данных разного разрешения, анализ пространственной изменчивости темпов эрозии и объемов потен-

циального смыва, а также определение соотношений последних и стока наносов исследуемых рек.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Модель водной эрозии. Для расчета потенциальной эрозии от дождевых осадков за счет плоскостной и ручейковой эрозии на территории исследуемого бассейна использовалось универсальное уравнение эрозии почв (*RUSLE*) [74]:

$$Y = R \times K \times LS \times C \times P, \quad (1)$$

где Y – смыв почвы с единицы площади в $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$; R – фактор осадков, представляющий собой среднесуточное значение эрозионного потенциала осадков (*ЭПО*), характеризующего эрозионную способность дождей, $\text{МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$; K – фактор эродированности (смываемости) почвы, численно равный модулю смыва с площадки длиной 22.1 м и уклоном 9%, содержащейся по бессменному пару и отнесенный к величине эрозионного потенциала осадков, $\text{т} \cdot \text{час} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$; L – фактор длины склонов, представляющий собой отношение смыва со склона некоторой длины к смыву со склона длиной 22.1 м при прочих равных условиях, безразмерный; S – фактор уклона, представляющий собой отношение смыва со склона некоторой крутизны к смыву со склона уклоном 9% при прочих равных условиях, безразмерный; C – индекс, отражающий влияние землепользования, который зависит от растительного покрова, безразмерный; P – фактор эффективности противоэрозионных мер, представляющий собой отношение смыва с поля, на котором применяются противоэрозионные меры к смыву с поля, на котором противоэрозионные меры не применяются, а обработка почвы и посев ведутся вдоль склона, безразмерный.

Результаты оценки эрозии подразделялись по степени опасности на 5 классов согласно ГОСТ 17.4.4.03-86: неопасные (интенсивность смыва менее $0.5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, слабоопасные ($0.5-11 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), среднеопасные ($1-5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), сильноопасные ($5-10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ и чрезвычайно опасные (более $10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) территории.

Рельеф. В качестве исходной цифровой модели рельефа использовалась модель составленная Дж. де Ферранти [48] путем синтеза глобальных ЦМР SRTM, ASTER GDEM и российских военных топографических карт на основе аэро- и геодезических съемок, проведенных в 1952 году. ЦМР доступна на сайте www.viewfinderpanoramias.org. Данная модель имеет пространственное разрешение примерно 90 м, качество модели подтвердилось многими исследователями [59, 80], а для условий Российской Арктики данная модель даже предпочтительнее нежели ASTER [59].

Орографические и морфометрические особенности рельефа местности оказывают наибольшее влияние на перераспределение продуктов плоскостного смыва и ручейковой эрозии. Влияние рельефа на процессы эрозии определяется его воздействием на формирование и перераспределение атмосферных осадков, распространение почвенного и растительного покрова, характер землепользования [89]. Формирование стока наносов зависит от средней высоты и уклона склонов, их длины, расчлененности территории [10, 16, 25]. В общем виде влияние рельефа на процессы эрозии на водосборе учитывает фактор рельефа, численно равный произведению LS в уравнении (1) [74]. Длина склона L при этом равна расстоянию от зоны поступления материала (верхняя часть склона) до зоны отложения переносимого материала (или первого принимающего водотока). Для оценки воздействия рельефа местности на водную эрозию последние исследования [67] рекомендуют использовать метод расчета, реализованный в ГИС *SAGA* [43] по уравнению [45]:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{U}{L_0} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{S_0} \right)^n, \quad (2)$$

Таблица 1. Значения фактора C для различных типов землепользования и подстилающей поверхности [36, 68]. Типы подстилающей поверхности определены по ESA GlobCover 2009 [37]. В скобках указана доля покрытия пикселя типом растительности

Table 1. C factors for specific types of land cover compiled from previous studies [36, 68]. Land cover types are defined with ESA GlobCover 2009 [37]

Тип подстилающей поверхности	C^{**}
Сельскохозяйственные земли (пашня)	0.15
Лес (лиственный, широколиственный, хвойный и смешанный)	0.003
Луговая растительность (50–70%)/кустарниковая (20–50%)	0.1
Редкая луговая и кустарниковая растительность (<15%)	0.1
Подтопляемые широколиственные леса	0.001
Городская застройка (урбанизировано >50% территории)	0.03
Оголенные земли	0.1
Водные объекты	0
Снег и лед	0
Нет данных	0

** Фактор C из уравнения $RUSLE$ (1)

где LS – фактор длины и крутизны склона из уравнения (1), безразмерный; U – выше-лежащая водосборная площадь, отнесенная к ширине потока, $m^2 \cdot m^{-1}$; L_0 , S_0 – длина и крутизна стандартной стоковой площадки Уишмейера-Смита [86] (22.1 м и 0.09°); β – крутизна склона, $^\circ$; m (0.4–0.6) и n (1.0–1.3) – эмпирические параметры, зависящие от доминирующего типа эрозии (плоскостной или ручейковой).

Землепользование. Пространственное распространение различных типов землепользования и растительного покрова было взято с карты ESA GlobCover 2009. Данная база данных была создана на основе изображений спектрометра $MEdiuM$ разрешения 300 м (MERIS) на борту спутника ENVISAT, собранных с января по декабрь 2009 года [37].

Значения фактора C используемые в моделях, основанных на $RUSLE$, зачастую определяются по таблицам [36]. Мы использовали данные собранные в [36, 68] для определения почвозащитного коэффициента подстилающей поверхности (табл. 1).

Почвенные ресурсы. Пространственное распределение почвенных ресурсов взято с карты масштаба 1 : 5000000 Harmonized World Soil Database v 1.2 [61]. Почвенная карта представлена в Приложении 1. Расчет коэффициента эродированности почвы K производился при помощи следующих уравнений [84]:

$$K_{USLE} = f_{csand} f_{cl-si} f_{orgc} f_{hisand}, \quad (3)$$

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \exp \left(-0.256 m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right) \right), \quad (4)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}, \quad (5)$$

Таблица 2. Исходные материалы и данные, используемые для расчета RUSLE в данной работе
Table 2. Summary of data sources used for RUSLE model

	Пространственное разрешение	Источник
Рельеф	3" × 3" (≈90 × 90 м)	ViewFinderPanoramas [48]
ЭПО**	30" × 30" (≈1 × 1 км)	Global Rainfall Erosivity [66]
Почвы	30" × 30" (≈1 × 1 км)	Harmonized World Soil Database v 1.2 [61]
Растительность	300 м × 300 м	ESA GlobCover 2009 [37]
Гидрография	–	HydroBASINS Version 1.0 [57]

** Эрозионный потенциал осадков (МДж · мм · ч⁻¹ · га⁻¹ · год⁻¹).

$$f_{orgc} = \left(1 - 0.0256 \times \frac{orgC}{orgC + \exp\left(-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right)} \right), \quad (6)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp\left(-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right)} \right), \quad (7)$$

где m_s – содержание песка, %; m_{silt} – содержание илистых частиц, %; m_c – содержание глины, %; $orgC$ – содержание органического углерода, %. Эти данные были получены из Harmonized World Soil Database v 1.2 [61].

Эрозионный потенциал осадков. В данной работе распределение ЭПО по исследуемым бассейнам было построено при помощи глобальной базы данных ЭПО, построенной [66] по 30-мин данным об осадках с 1961 по 1983 гг.

Расчет модели. Все операции с пространственными данными выполнялись в ГИС QGIS 3.14, постобработка результатов и статистический анализ производился в R [73]. Поскольку алгоритм RUSLE состоит в последовательном перемножении растровых слоев и не зависит на этапе расчета от структуры гидрографической сети, расчет велся отдельно для каждой зоны UTM для более рационального использования вычислительных мощностей. Территории исследуемых водосборов располагаются в 20 зонах UTM (от 40N до 59N), для каждой из которых был произведен расчет водной эрозии, т.е. подготовлены растровые слои рельефа, ЭПО и землепользования. Площади речных бассейнов исследуемых рек и их притоков определены по HydroBASINS Version 1.0 [57].

Все исходные данные (табл. 2) приводились к разрешению используемой в данном исследовании ЦМР, т.е. к 3" × 3". Таким образом, полученные в ходе исследования карты интенсивности смыва почв имеют пространственное разрешение 3" × 3".

Результаты расчетов, представленных в данной работе (*модель 1*), сравнивались с другими оценками исследуемых территорий, полученных на основе отличных исходных данных:

Модель 2 [42, 81] построенная ранее авторами на основе GMTED2010 [44], с размером ячейки сетки матрицы 7.5 × 7.5 сек, что эквивалентно пространственному разрешению 250 × 250 м. Фактор C (землепользование) определялся по эмпирическим зависимостям от нормализованного индекса растительности (*NDVI*), предложенного Fu et al. [49]. В качестве исходных данных о пространственном распространении типов почв и их физи-

ческих характеристиках использовалась “Почвенная карта России”, созданная почвенным институтом им. В.В. Докучаева и вошедшая в Европейскую географическую почвенную базу данных [29].

Модель 3 была рассчитана только для бассейна р. Лена [26] на основе ЦМР с разрешением на основе ЦМР 250 × 250 м GMTED2010 [44]. Для пространственной оценки распространения типов земного покрова авторы использовали собственную карту, построенную по спутниковым данным MODIS Terra, используя методику пост-обработки предложенную Барталевым с соавторами [3].

Модель 4 (GLOSEM). Глобальная модель [38] построенная на ЦМР ASTER и SRTM, с разрешением пониженным до ≈250 м. Данные о растительном покрове использовались из MOD44B Vegetation Continuous Fields product, почвенном покрове — ISRIC SoilGrids [53].

Для каждой из этих моделей n определялось отклонение расчета от модели 1 по формуле:

$$\Delta Y = \frac{Y_1 - Y_n}{Y_1}, \tag{8}$$

где Y_1 — смыв почвы с единицы площади в $t \cdot ga^{-1} \cdot год^{-1}$ по модели 1 (данная работа), Y_n — смыв почвы с единицы площади в $t \cdot ga^{-1} \cdot год^{-1}$ по модели n (см. описание выше).

Для пространственных оценок эрозии почв использовался суммарный модуль смыва почв (y , $t \cdot км^{-2} \cdot год^{-1}$), рассчитанный как соотношение суммарной эрозии на водосборе (ΣY , $t \cdot год^{-1}$) к площади водосбора (A , $км^2$):

$$y = \frac{\Sigma Y}{A}. \tag{9}$$

Соотношение эрозии почв и стока наносов. Эрозия на водосборе является одной из важнейшей составляющей стока наносов [1]. Соотношение формирования и итогового потока наносов в замыкающем створе бассейна характеризуют масштабные коэффициенты, или коэффициенты редукции стока наносов, которые представляют собой соотношение объемов перемещаемого грунта в пределах водосбора в результате разных природных и антропогенных процессов [32]. Сток взвешенных W_R и влекомых W_G веществ оказывается меньше, чем объемы грунта, перемещаемого в пределах бассейна техническими средствами $W_{техн}$; в результате эрозии на водосборе и в руслах рек соответственно $W_{эр}$ и $W_{русл}$; за счет эоловых $W_{эол}$, процессов и деятельности ледников $W_{ледн}$. Таким образом, мы предполагаем, что для каждой эрозионно-русловой системы верно следующее:

$$k = \frac{W_{техн} + W_{эр} + W_{русл} + W_{эол} + W_{ледн} + W_{неучт}}{W_R + W_G}, \tag{10}$$

где k — масштабный коэффициент эрозионно-русловых систем, $W_{неучт}$ — эрозия за счет неучтенных факторов. Перемещение материала на водосборе $W_{эр}$ связано с совокупной деятельностью склоновой и овражной эрозии, овражных и оползневых процессов, крипа. Роль того или иного процесса в формировании стока наносов в первую очередь определяется ландшафтно-климатическими условиями на водосборе, рельефом территории, литологией горных пород, а также степенью антропогенной нагрузки [10, 27, 79, 83].

В этой связи коэффициент $K_{эр} = \frac{W_{эр}}{W_R + W_G}$ характеризует объем наносов, задерживаемых на водосборе или в пределах русловой сети. Его обратная величина $\frac{1}{K_{эр}}$, часто

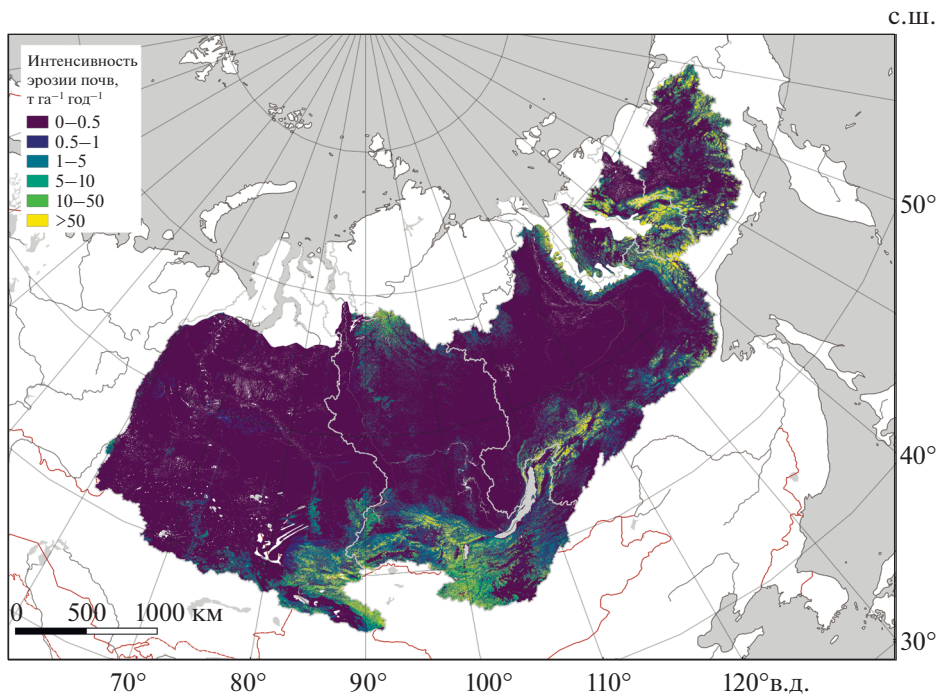


Рис. 1. Потенциальные среднеголетние потери почв в бассейнах рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма.

Fig. 1. Potential average annual soil losses in the Ob, Yenisei, Lena, Yana, Indigirka and Kolyma basins.

рассматриваемая в качестве доли наносов бассейнового происхождения, достигающая рек (коэффициент доставки наносов, КДН), на самом деле таковой не является в силу погрешности масштабирования оценок и несоответствия измеряемого и фактического стока наносов – $W_{\text{неучт}}$ [55, 70, 71]. Всегда в пределах ЭРС справедливо соотношение $W_{\text{неучт}} \neq \text{КДН} \times W_{\text{эр}}$ в связи с существованием других, не связанных с процессами на водосборе, источников поступления наносов в реки, даже при учете только взвешенных наносов. В этой связи нами проводилось сопоставление суммарных объемов для характеристики минимальной доли наносов бассейнового происхождения, задерживаемого в речных бассейнах.

Для расчета $K_{\text{эр}}$ использованы оценки стока наносов, полученные на замыкающих постах с использованием либо мониторинговых данных МГУ (Обь, Енисей, Колыма) [14], либо сетевых данных по постам УГМС (Лена, Яна, Индигирка), обобщенных в работе [18] дополненных сведениями о стоке влекомых наносов по Н.И. Алексеевскому [1], а для рр. Яна и Индигирка – исходя из соотношения стока влекомых наносов к общему стоку в 30%, как среднее для рек данного региона и масштаба [82].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании эмпирической модели эрозии почв RUSLE для шести водосборов рек бассейна Северного Ледовитого Океана (рр. Обь, Енисей, Лена, Яна, Индигирка и Колыма) была посчитана среднеголетняя интенсивность эрозии почв. Она оцени-

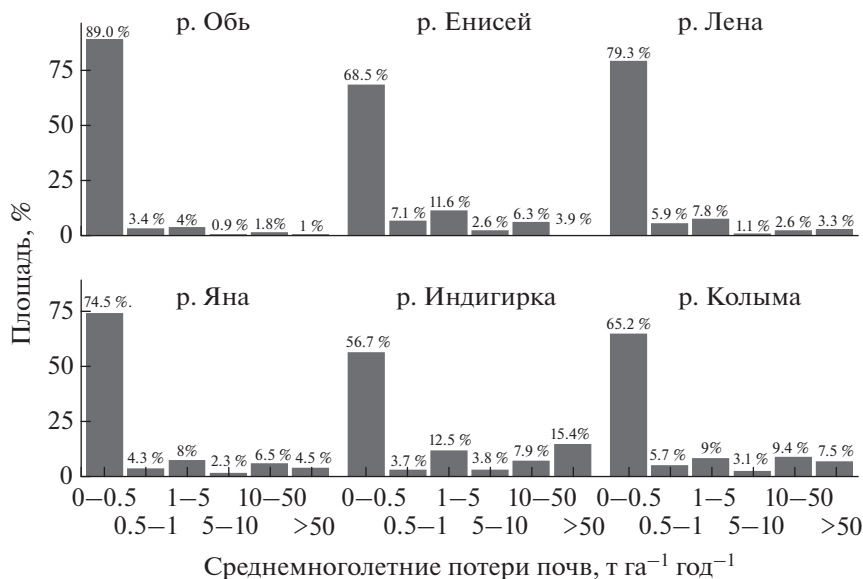


Рис. 2. Распределение потенциального смыва почв ($t \cdot ga^{-1} \cdot год^{-1}$) по площадям исследуемых бассейнов. Классы опасности соответствуют классам ГОСТ 17.4.4.03–86.

Fig. 2. Distribution of potential soil loss by area within studied basins ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$). Hazard classes correspond to those of GOST 17.4.4.03–86.

вается величиной $6888 \times 10^6 t \cdot год^{-1}$. Наименьшие средние темпы эрозии наблюдаются на территории водосбора рр. Лена ($5.27 t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$) и Обь ($1.98 t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$). Самые высокие региональные темпы эрозии характерны в бассейне р. Лена — в Казачинско-Ленском районе Иркутской области ($218 t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$) и Муйском районе Бурятской республики ($158 t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$). Наибольшие средние темпы эрозии на территории бассейна р. Енисей наблюдаются в Окинском районе Бурятской республики ($191 t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$). Преимущественно вся юго-западная часть территории бассейна

Таблица 3. Показатели описательной статистики среднемноголетней интенсивности эрозии почв ($t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$) в бассейнах исследуемых рек

Table 3. Summary statistics of mean annual soil erosion rates ($t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$) averaged by watersheds

	Среднее	Станд. отклон.	Cv	Медиана	Первый квартиль	Третий квартиль
Обь	1.98	12.2	16.2	0.21	0.007	0.29
Енисей	6.37	24.6	25.9	0.15	0.008	0.94
Лена	5.27	27.2	19.4	0.02	0.004	0.31
Яна	11.2	35.1	31.8	0.33	0.01	2.37
Индигирка	33.3	76.5	43.6	0.57	0.05	15.1
Колыма	11.4	33.4	34.1	0.12	0.004	1.96

р. Енисей характеризуется очень высокой интенсивностью эрозии почв (рис. 1), на долю которых приходится 11.6% территории бассейна.

Для большинства бассейнов рек характерно логнормальное распределение интенсивности эрозии внутри водосбора (за исключением Индигирки) – подавляющие площади относятся к 1-му классу (ГОСТ 17.4.4.03–86) опасности (рис. 2), где интенсивность эрозии не превышает $0.5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

Как видно из гистограмм среднемноголетней интенсивности (рис. 2), распределение этих величин схоже для всех водосборов. Помимо пика малых значений, на всех водосборах наблюдается увеличение площадей занятых 3 классом ($1\text{--}5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) и для некоторых водосборов так же 5 и 6 классами (например, р. Индигирка). Безусловно, бимодальность распределения сказывается и на показателях описательной статистики, которые для бассейна р. Индигирка являются наибольшими (табл. 3).

Верификация результатов модели эрозии почв и методические ограничения ее использования. Валидация и верификация моделей эрозии почв – сложная и трудновыполнимая задача, требующая многолетних наблюдений на стоковых площадках [16]. На бассейновом уровне обычно проводят визуальное и количественное сравнение со спутниковыми снимками, картами эрозии и другими моделями эрозии [38, 39]. Традиционно модели эрозии разрабатывались для практически субгоризонтальных площадок с короткими склонами и небольшими уклонами, в то время как количество исследований на склонах с уклоном более 50% очень мало [58, 62]. Однако, модельный подход, реализованный в данной статье основан на данных с высоким разрешением. Согласно предыдущим исследованиям [56, 64, 76], качество входных данных является предпосылкой для получения надежных и устойчивых характеристик модели RUSLE.

Разница расчетов по моделям 1 и 2 (табл. 4) достигает 100%, причем если для бассейна Лены оценки по модели 2 выше, чем по 1, то для бассейнов Енисея и Оби они, наоборот, ниже. Среднее значение потенциального суммарного смыва по модели 3 [26] для бассейна р. Лена более чем на 300% ($\Delta = -389\%$) превосходит полученную нами оценку. Отличия оценки глобальной среднемноголетней интенсивности эрозии почв *Borrelli et al.* [38], выполненной с пространственным разрешением $250 \times 250 \text{ м}$ (модель 4, GLOSEM), занижает средние величины интенсивности эрозии в пределах 100%. Это свидетельствует о неопределенности расчетов эрозии на мелкомасштабных ЦМР (модели 2–4). Экспериментальные исследования чувствительности эрозионных моделей свидетельствуют о том, что при уменьшении пространственного разрешения ЦМР увеличивается интенсивность смоделированной эрозии за счет более точного расчета фактора LS. При сравнении моделей эрозии, рассчитанных на основании 250 м и 90 м разрешения, следует ожидать увеличение темпов смыва в 1.7–1.8 раза [87]. При этом, согласно предыдущим исследованиям [46, 88], длина и уклон склона являются важнейшими факторами эрозии.

Стоит отметить, что различия в медианных величинах, при меньшей изменчивости интенсивности для GLOSEM, не столь очевидны (рис. 3). Похожая закономерность наблюдается и для моделей, сравниваемых в настоящем исследовании. Например, средние значения темпов смыва модели GLOSEM ниже в 6.7 раз, тогда как медианные значения ниже в 2 раза. Завышение средних величин может быть вызвано неестественно высокими показателями LS для горных территорий и районов с крутыми склонами ($>26.6^\circ$ [51, 85]). Учитывая асимметричность распределения величин смыва почвы по бассейну, присущую эмпирическим моделям на основе RUSLE [69], репрезентативнее сравнивать медианные величины смыва почв, соотношение между которыми (превышение в 2 раза над GLOSEM) авторам кажется естественным.

Для анализа достоверности полученных результатов было также произведено сравнение их с оценками Л.Ф. Литвина [89] (табл. 4). Поскольку Л.Ф. Литвин проводил оценки интенсивности только для с/х земель, то для бассейнов рр. Лена и Енисей, их корректнее сравнивать с темпами эрозии только с/х освоенных земель, которые пре-

Таблица 4. Сравнительный анализ осредненных оценок эрозии крупных бассейнов рек РФ
Table 4. Summary of different studies that previously assessed soil erosion in Siberian basins

Исходные данные и результаты оценки для бассейна		Модель 1 (данная работа)	Модель 2 [42, 81]	Модель 3 [26]	Модель 4 [38]	Литвин и др., 2002 [89]**
ЦМР		ViewFinderPanoramas [48]	GMTED2010 [44]		SRTM 3, ASTER GDEM v2	—
Растительность		ESA GlobCover 2009 [37]	На основе NDVI, рассчитанных по снимкам Landsat [49]	Данные MODIS, обработанные [3]	MOD44B Vegetation Continuous Fields product	—
Почвы		Harmonized World Soil Database v 1.2 [61]	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [29]		ISRIC Soil-Grids [53]	—
Средне-голетняя интенсивность эрозии почв $t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$	Бассейн р. Енисей	6.37 (14.52)*	0.11 (1.04)*	—	1	(1)*
	Бассейн р. Лена	5.27 (5.7)*	7.6 (3)*	42.3	1.1	(5.87)*
	Бассейн р. Яна	11.2	0.73	—	4.2	—
Отклонение от модели 1, %	Бассейн р. Енисей	—	98.3	—	92	93
	Бассейн р. Лена	—	—44.2	—389.6	79	—3
	Бассейн р. Яна	—	93.5	—	63	—

* (в скобках значения только для с/х угодий), ** только для с/х земель.

имущественно заключены между 40° и 50° с.ш. Тем не менее, к данному сравнению следует относиться аккуратно, так как оценки эрозии почв проведены для различных временных диапазонов: в данной работе мы учитывали эрозию почв в современных условиях, в то время как Л.Ф. Литвин рассматривал более ранние исторические периоды. Кроме того, следует учитывать, что с конца XX века для территории Российской Федерации было характерно повсеместное сокращение посевных площадей в 2–3 раза [17, 23]. Однако, результаты наших расчетов соответствуют экспериментальным наблюдениям за эрозией на сходных типах земель (многолетние травы, луга и пашня) по наблюдениям на опытно-производственном стационаре при Алтайском НИИСХ и Усть-Каменского лесостепного противоэрозионного стационара, который располагается в водосборе Оби недалеко от Барнаула [6]. Различия экспериментальных значений с расчетными не превышают 30%, что также может быть объяснено не учетом талой эрозии в универсальном уравнении эрозии (1). Кроме того, результаты нашего исследования сопоставимы с действительной расчетной эрозией на пашне подтайги Западной Сибири, рассчитанной на основе модели USLE [19], и изменяющейся в пределах $0.001–15.4 t \cdot га^{-1} \cdot год^{-1}$ (наибольшие значения получены для апреля и октября, наименьшие — для августа).

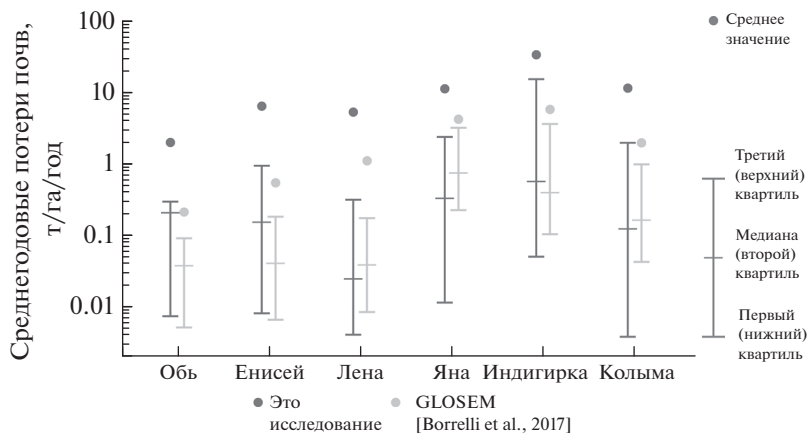


Рис. 3. Основные характеристики интенсивности эрозии почв, оцененные в рамках данного исследования и по результатам модели GLOSEM [38]. Ось ординат логарифмическая.

Fig. 3. Main characteristics of soil erosion intensity assessed in this study and by the GLOSEM model [23]. The ordinate axis is logarithmic.

Несмотря на то, что уравнение RUSLE и его модификации успешно применяются для моделирования эрозии почв во всем мире [34, 36], опыт его применения для условий арктических рек ограничен [47]. Предыдущие оценки эрозии почв указывают на удовлетворительную адаптацию модифицированного универсального уравнения эрозии почв к арктическим условиям [47, 78]. Одна из причин популярности моделирования (R)USLE, заключается в том, что это хороший компромисс между доступностью с точки зрения требуемых исходных данных и относительно хорошей надежностью получаемых оценок потерь почвы [33].

Полученные результаты характеризуют исключительно роль дождевой эрозии в балансе наносов исследованных речных бассейнов. Моделирование талой эрозии не проводилось из-за меньшей проработанности этого вопроса, хотя известно, что в Западной Сибири снеготалые воды являются одним из ведущих факторов эрозии почв [24]. Значительная трансформация ландшафтов Российской Арктики в Антропоцене (преимущественно через развитие горнодобывающей деятельности и дорожной сети) [4] привела к активизации процессов термокарста и термоэрозии, а так же обвалов, осыпей [5] и криогенных склоновых процессов [30]. Авторы допустили, что вклад данных процессов в сток наносов в масштабах крупных речных бассейнов на фоне русло-вой и дождевой эрозии невелик, учитывая предыдущие наработки по это теме [41].

Некоторые исследователи обобщают, что для крупных речных бассейнов влияние талого стока намного больше дождевого, так как при снеготаянии увеличивается единовременный охват территории [89]. Однако, для территорий Арктических рек во время снеготаяния наибольшая интенсивность эрозионных процессов наблюдается в конце снеготаяния, поскольку значительная часть талого стока, проходящего по мерзлой почве, не вызывает существенных величин смыва [20]. Согласно наблюдениям О.И. Баженовой [2], тальми водами сносится около 30% годовой величины твердого стока, аналогичное соотношение установлено для лесостепной части Приангарья. Сравнительный анализ интенсивности талой и дождевой эрозии, выполненный Г.П. Сурмачем [20] по результатам эксперимента, произведенного на территории правобережья Нижней Волги, показал, что при прочих равных условиях, величины смыва почв от ливневых дождей существенно превосходят аналогичные значения от воздей-

ствия талых вод. В целом сходные результаты получены в работах Танасиенко А.А. [21] и Евсеевой Н.С. [11] для условий Сибири. Однако для южной тайги Томь-Яйского междуречья (Западно-Сибирская равнина) установлен достаточно большой разброс значений интенсивности эрозионного смыва: с пашни может выноситься от 0.5–3 до 55–81 м³/га почв за период снеготаяния [12, 13]. Единственная известная нам оценка талой эрозии для крупных речных бассейнов, выполненная А.В. Шынбергеновым [26] с использованием модели дождевой и талой эрозии для бассейна Лены, указывают на соотношение 61 против 39%. С учетом того, что в формировании величины $W_{\text{эп}}$ (см. уравнение 10) ключевую роль играет дождевая эрозия, полученные результаты можно рассматривать как интегральную меру интенсивности эрозионных процессов. Тем не менее, невозможность учета талой эрозии в используемой модели RUSLE накладывает ограничения на использование данной модели на изучаемой территории и может вызывать занижение оценок эрозии, что стоит учитывать в дальнейших исследованиях.

Горный рельеф исследуемой территории также обуславливает ряд сложностей в использовании данной модели, поскольку на крутых склонах активизируются оползневые процессы, обеспечивающие поступление большого количества почвенного материала в речное русло. Однако, опыт использования моделей (R)USLE показывает их применимость для горной местности. Так, использование данной модели для пашни на территории крупного гористого речного бассейна реки Санси в Китае позволило оценить интенсивность эрозии, связанной с фрагментированным растительным покровом – она составила 120.62 т · га⁻¹ · год⁻¹ [77]. На территории горного перевала Индаги в Турции (абс. высота 1196–1410 м над уровнем моря) на участках пашни интенсивность эрозии, оцененная по модели USLE составила 34.3 т · га⁻¹ · год⁻¹ [65]. В горных регионах Среднего Атласа в Марокко интенсивность эрозии почв в бассейне реки Иккур, оцененная по этой же модели, составила 0.68 т · га⁻¹ · год⁻¹ [54]. Однако, результаты моделирования почвенной эрозии в Альпах (USLE), верифицированные по измеренным значениям эрозии (по методу Cs-137), показали некоторое занижение рассчитанных значений [60], что также следует учитывать при интерпретации и дальнейшем использовании модельных значений.

Еще одним методическим ограничением использования результатов моделирования является малое количество почвенных разрезов на территории Сибири, входящих в базу данных WISE, на которой частично построена используемая в этой статье база данных Harmonized World Soil Database (HWSD). Однако, привлечение дополнительной информации при создании Harmonized World Soil Database v 1.2 позволило построить 3855 почвенных ареалов на территории Европы и Российской Федерации, что на взгляд авторов позволяет считать данные из Harmonized World Soil Database v 1.2 достаточно репрезентативными для нашего исследования. На территорию Российской Федерации альтернативой HWSD может служить Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (ЕГРПР) [29]. Его преимуществом является более детальная проработка почвенной карты (масштаб 1 : 1 000 000), однако в ЕГРПР отсутствует информация о гранулометрическом составе большинства почв, представленных на территории исследуемых бассейнов. Более того, южные части бассейнов р. Обь и р. Енисей, располагающиеся в Казахстане, Китае и Монголии, не включены в ЕГРПР.

Пространственные закономерности эрозии почв. Объемы потенциальной эрозии в 6 крупнейших арктических водосборах составляют около 1/6 от величины глобальной эрозии по глобальной модели GLOSEM [38]. Для всех бассейнов отмечается увеличение эрозии в южном направлении, соответствующие общему усилению антропогенного пресса на территорию водосбора. В южной части бассейна р. Енисей смыв почв увеличивается в 15 раз по сравнению с северными, в бассейне р. Обь – почти в 10 раз. В бассейне Енисея это определяется хозяйственно-экономическими причинами – расположением верховьев бассейна р. Енисей в Монголии и КНР. На этом фоне отме-

Таблица 5. Оценка объемов потенциальной эрозии на водосборе и стока наносов рек в замыкающих створах**Table 5.** Summary statistics of total soil loss, and basin sediment yields calculated for the outlet gages

	Широта	Обь	Енисей	Лена	Яна	Индигирка	Колыма
Суммарная эрозия почв, млн т · год ⁻¹	45–50	430	425				
	50–55	293	1070	26.1			
	55–60	34.1	146	729			
	60–65	17.6	29.4	606	8.03	796	366
	65–70	4.32	211	266	194	853	338
	70–75			40.5	5.21	0.71	
	ВСЕГО		778	1881	1668	207	1650
Сток наносов WR + WG, млн т · год ⁻¹		58.2	32.5	38.6	5.55	16.77	19.9
Масштабный коэффициент $K_{эp}$		13.4	57.9	43.2	37.3	98.4	35.4

чены обратные тенденции внутри бассейна р. Лена, связанные с влиянием фактора рельефа, который может вносить некоторые искажения в расчеты эрозии почв, связанные с большой площадью горных территорий (что обсуждалось выше). Повышенные значения эрозии для бассейна р. Индигирка также связаны с высокой средней высотой водосбора (655 м) и расчлененностью рельефа. При этом, около половины водосбора располагается в Яно-Индигирской низменности. В связи с этим, и распределение среднегодовой интенсивности и абсолютные величины отличаются от более крупных бассейнов рек Оби, Енисея, Лены и др. (табл. 5).

В Приложении 2 приведены основные показатели описательной статистики рассчитанной в рамках данной работы среднегодовой интенсивности эрозии почв (среднее, медиана и стандартное отклонение) для основных типов почв, встречающихся на территории исследуемых бассейнов. Исходя из полученных данных, в бассейнах всех исследуемых рек наименьшая величина среднегодового смыва (0.2–3.3 т · га⁻¹ · год⁻¹) установлена для различных торфяных (*Histosols*) и пойменных (*Fluvisols*) почв, обычно встречающихся на относительно ровных задернованных участках рельефа, и кроме того для подзолистых почв (*Podzoluvisols*) в бассейне Енисея, песчаных (*Arenosols*) в бассейне Лены, и глеевых почв (*Gleysols*) в бассейне Оби. Наибольшая интенсивность эрозии (до 87.2 т · га⁻¹ · год⁻¹) установлена для встречающихся на территории всех изучаемых бассейнов горных каменистых (*Leptosols*) и арктических (*Regosols*) почв, имеющих слаборазвитый или маломощный профиль и расположенных под плохо сформированным или фрагментарным растительным покровом. Авторы находят, что рассчитанные показатели среднегодовой интенсивности почв для рр. Яна и Индигирка завышены, так как средние или медианные показатели смыва лептосолов (*Leptosols*) в несколько раз превышают фоновые значения. Вероятно, это вызвано высокими значениями коэффициента LS в горных районах, где преобладают эти почвы, а так же отсутствием точных данных о гранулометрическом составе почв данного региона в использованной базе данных почвенных ресурсов [61].

Соотношение эрозии и стока наносов. Выполненные оценки масштабного коэффициента $K_{эp}$ (см. уравнение 10) указывают на исключительно аккумулирующий режим эрозионно-русловых систем крупных рек (см. табл. 5). Во всех случаях $K_{эp} > 10$, т.е. более 90% продуктов эрозионного смыва не достигает устьевых створов рек.

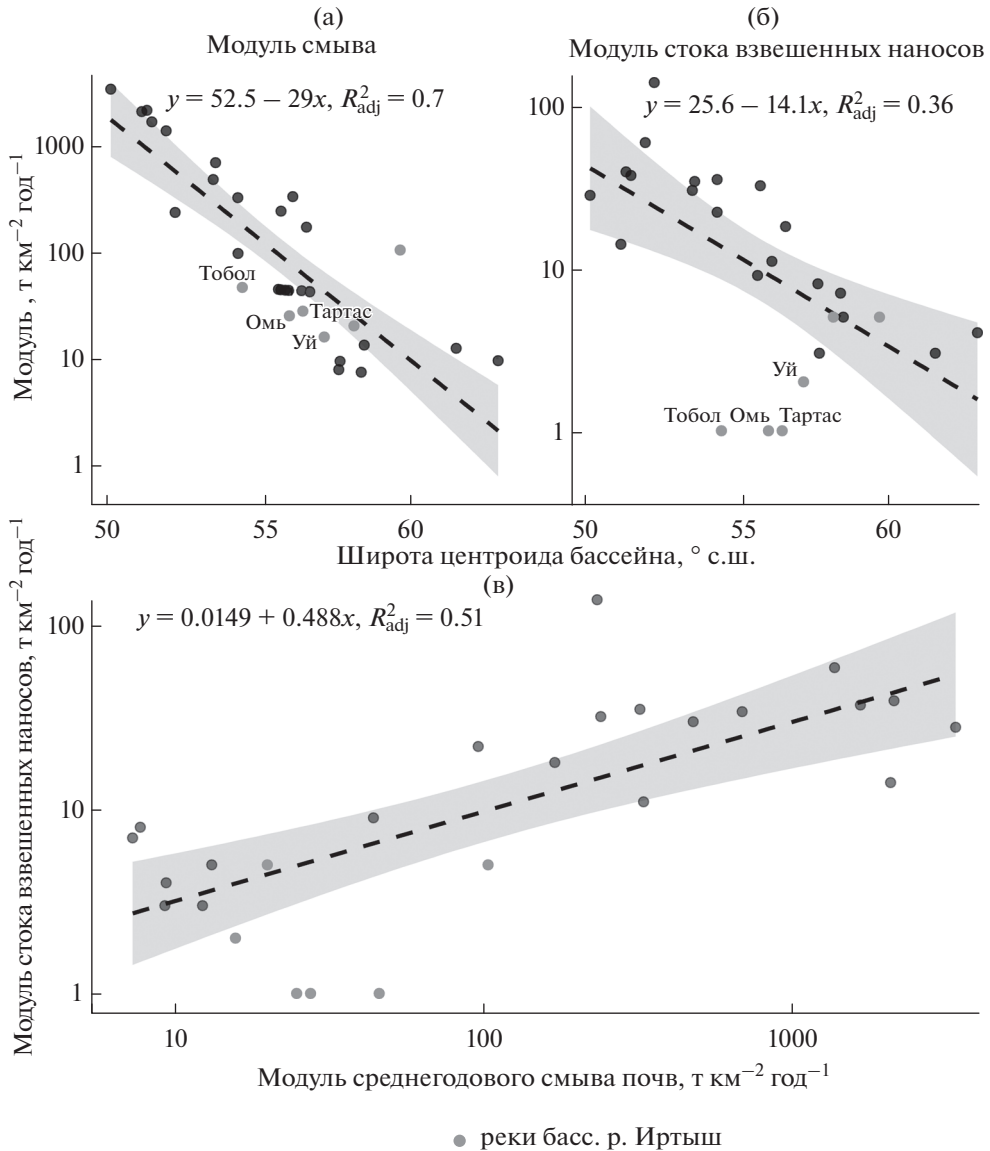


Рис. 4. Связь модуля смыва почв (а, уравнение 9) и модуля стока взвешенных наносов (б) с географической широтой бассейна. Отношение модулей стока взвешенных наносов к модулю среднегодового смыва почв (в) для рек бассейна Оби. Красным выделены реки бассейна р. Иртыш.

Fig. 4. Relationship between soil loss yield (а, equation 10) or suspended sediment yield (б) and basin's centroid latitude. Suspended sediment yield—soil loss yield relationship (в) for the rivers of the Ob basin. Rivers in the Irtysh River basin are highlighted in red.

Для Оби было произведено более детальное сравнение среднееголетней интенсивности эрозии почв со стоком наносов на основании данных с 26 гидрометрических постов со средней продолжительностью наблюдений 56 лет. Для каждого водосборного бассейна определялся суммарный среднееголетний объем эрозии почв (тонн).

Эта величина, отнесенная к площади водосбора, обозначает среднемноголетний модуль смыва ($\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Для рек бассейна Оби существует слабая положительная связь ($R^2 = 0.51$) модуля стока наносов с суммарным смывом почвы на водосборе (рис. 4). Увеличение модуля смыва на 10% приводит к увеличению стока наносов на 5%. Это характеризует увеличение $K_{\text{эп}}$ по мере роста водосбора, что соответствует ранее отмечавшимся тенденциям [7] для бассейнов с/х освоенных территорий (р. Дон, р. Ока). Невысокий коэффициент аппроксимации регрессионной модели, в первую очередь определен условиями формирования стока наносов на водосборах рр. Уй, Омь и Тартас (бассейн р. Иртыш). При средних размерах водосборов для них характерны низкие величины среднегодовых расходов наносов (0.2–0.5 кг/с), практически неизменные за период наблюдений ($Cv = 0.47–0.65$).

Данные реки протекают на северной границе зоны возделывания зерновых культур (преимущественно пшеница и яровая пшеница) в Западно-Сибирском лесостепном сельскохозяйственном районе. Несмотря на большое количество возделываемых земель, пастбищ и пашен, лишь незначительная часть наносов поступает в водотоки. Столь азонально низкие величины стока наносов определяются высокой заболоченностью территории – все эти реки берут начало из Большого Васюганского болота. Так же важную роль оказывает пологий рельеф территории (средняя высота водосборов 120–140 м): длинные и пологие склоны захватывают большую часть (90%) эродированного материала.

Характерное для бассейнов Сибири увеличение среднемноголетней интенсивности эрозии почв с юга на север, определенное по результатам моделирования, подтверждается соотношением широты (центроида бассейна, т.е. его географического центра) и модулем стока наносов (рис. 4). Каждый градус модуль смыва понижается примерно на 7%, тогда как модуль стока наносов – на 2.5%. Различие в качестве аппроксимации линейной модели между стоком наносов и модулем смыва существенное и вызвано не только наличием выбросов (реки бассейна Иртыша), но и активизацией русловых процессов в среднем и нижнем течении реки.

Модуль стока наносов неравномерно уменьшается по длине реки Обь: на участке между Барнаулом и Камнем-на-Оби происходит его повышение в 1.5 раза. В тоже время, такая продольная изменчивость нехарактерна для модуля смыва (рис. 5) – его величины равномерно уменьшаются по длине реки. Это косвенно указывает на наличие дополнительных источников наносов (русовая эрозия) на участке Барнаул – Камень-на-Оби. Последующее падение величин модуля стока наносов связано с перехватывающим эффектом водохранилищ: из-за Новосибирского водохранилища сток наносов в Колпашево уменьшается в 2.7 раз, при этом модуль смыва уменьшается в 14 раз. На участке Колпашево-Белогорье сток наносов уменьшается 2.2 раза, а модуль смыва в 2.4 раза за счет совместного эффекта Каратомарского водохранилища и вдхр. Зайсан на территории Казахстана. При этом прогнозные значения модуля смыва указывают, что дальнейшего изменения показателей эрозии по мере увеличения площади не происходит. К замыкающему створу в Салехарде модуль смыва уменьшается всего лишь на 5% до $42.1 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, а модуль стока наносов от Белогорья до Салехарда понижается на 45% до $5 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [18]. Такая разница между относительным снижением бассейновой эрозии и стока наносов указывает на исключительно аккумулярующий режим Нижней Оби. Это подтверждается натурными данными: при измерениях экспедиции МГУ на пике половодья в 2019 года (общий расход воды $25000 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) на Малой Оби (правый рукав) в верхней ее части преобладали значения более $50 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, в нижней – от $30–40 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, на Горной Оби (левый рукав) – от 40 до $30 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

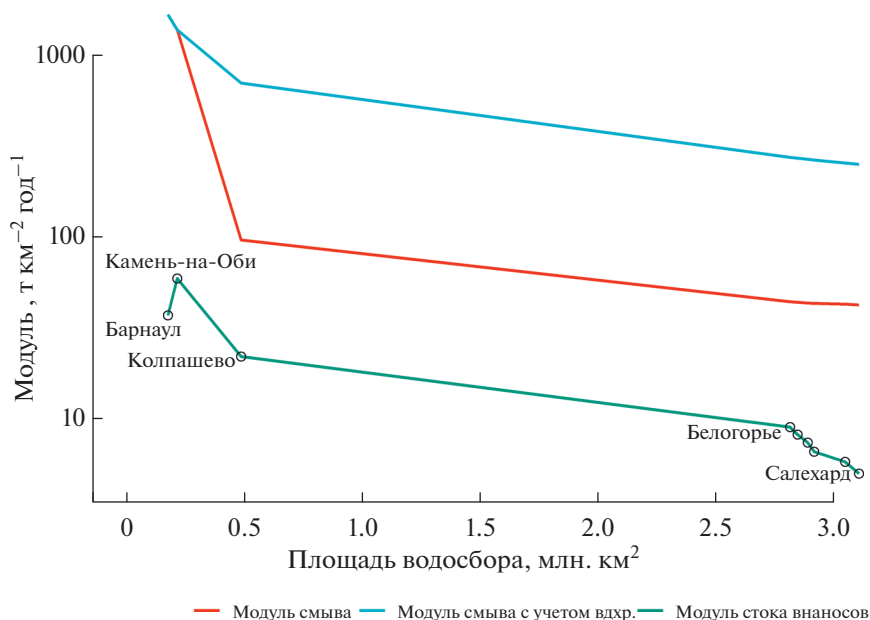


Рис. 5. Изменение модуля смыва и модуля стока наносов по длине р. Обь.

Fig. 5. Changes in suspended sediment yield or soil loss yield along the length of the Ob River.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые приведена крупномасштабная (90 × 90 м) оценка эрозионной опасности почв крупнейших речных систем Сибири и Дальнего Востока. В субмеридиональном направлении для всех бассейнов отмечается увеличение эрозии с севера на юг, соответствующее общему усилению сельскохозяйственного использования земель и повышению расчлененности рельефа. Фактор рельефа оказался определяющим в формировании эрозии почв на водосборах Яны, Индигирки и Колымы, тогда как более крупные бассейны (Лена, Енисей и Обь), практически одинаково подвержены влиянию всех факторов.

Наименьшие среднегодовые темпы эрозии на исследуемой территории характерны для торфяных (*Histosols*) и пойменных (*Fluvisols*) почв, расположенных на относительно выровненных и задернованных участках рельефа, в то время как наибольшие — для горных каменистых (*Leptosols*) и арктических (*Regosols*) почв крутых склонов с фрагментарным растительным покровом.

Сравнение созданной модели с прежними более мелкомасштабными оценками эрозии почв показало как увеличение оценок среднегодовых темпов эрозии в среднем в 2–10 раз, так и их уменьшение в 10 раз. Мы предполагаем, что увеличение показателей эрозии связано в первую очередь с увеличением детальности ЦМР, что привело к более точной оценке длины и крутизны склонов. Наибольшая разница оценок (в 10 раз) наблюдается при сравнении с моделями, основанными на 250 м ЦМР *GMTED2010*, наименьшая (в 2 раза) — при сравнении с *SRTM*, уменьшенной до 250 м.

Выполненные оценки масштабного коэффициента Кэр на основе использования данных о стоке взвешенных и влекомых наносов указывают на исключительно аккумулярующий режим эрозионно-русловых систем крупных рек. Во всех случаях $K_{эр} > 10$, т.е. более 90% продуктов эрозионного смыва не достигает устьевых створов рек. Это подтвер-

ждается и более детальным сравнением модельных данных с натурными для рек бассейна р. Обь.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и по госзаданию НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ (проект No 121051200166-4). Полевые работы и разработка модели эрозии проводились в рамках проекта РНФ 21-17-00181.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. Москва: Географический факультет МГУ Москва, 1998. 202 с.
2. *Баженова О.И.* Закономерности движения рыхлого материала на лесостепных склонах в Назаровской впадине (по результатам стационарных наблюдений) // География и природные ресурсы. 1988. С. 53–73.
3. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. вып. 4. С. 285–302.
4. *Беляев Ю.Р., Харченко С.В., Романенко Ф.А., Еременко Е.А., Матлахова Е.Ю.* Антропогенная трансформация рельефа Арктической зоны России: хронология, география, интенсивность // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. ВНИИОкеангеология/АНИИ Санкт-Петербург, 2020. С. 18–23.
<https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10702>
5. *Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Болысов С.И., Фузелина Ю.Н.* Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. вып. 1. С. 42–56.
6. *Вольнов В.В., Бойко А.В., Чичкарев А.С.* Опыт использования противозерозионных гидротехнических сооружений в борьбе со стоком талых вод и смывом пахотных почв на склоновых землях Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017.
7. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. ГЕОС Москва, 2006.
8. *Голосов В.Н., Ларионов Г.А., Сидорчук А.Ю.* Исторический этап в освоении эрозионно-русловых систем // Эрозионно-русловые системы / ред. Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю. М., 2017. С. 702.
9. *Гусаров А.В.* Определение минимальной продолжительности ряда наблюдений за стоком взвешенных наносов с целью корректной оценки пространственно-временной изменчивости интенсивности эрозии в их бассейнах // Геоморфология. 2017. вып. 1. С. 19–29.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-19-29>
10. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Издательство Казанского Университета, 1984. 264 с.
11. *Евсеева Н.С.* Современный морфолитогенез юго-востока Западно-Сибирской равнины. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 484 с.
12. *Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Осинцева Н.В., Алеев В.В.* Количественная оценка смыва почв в агроландшафтах южной тайги // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ. Томск: НИ ТГУ, 2015. С. 185–189.
13. *Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Людкевич Е.И.* Эрозионные процессы в природно-антропогенных геосистемах южной тайги Западно-Сибирской равнины и их геоэкологические аспекты // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. вып. 5. С. 442–449.
14. *Иванов В.В., Чалов С.Р.* Оценка стока и состава наносов р. Обь // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием. М., 2019. С. 219–222.

15. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. Москва: Издательство Московского Университета, 1993. 200 с.
16. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения / ред. Светличный А.А. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
17. Лысанова Г.И., Сороковой А.А. Потенциал земельных ресурсов регионов Сибири // География И Природные Ресурсы. 2015. вып. 2. С. 149–155.
18. Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. вып. 6. С. 17–24.
19. Савельева Д.А., Каличкин В.К. Внутрисезонный мониторинг водной эрозии почв пашни в подтайге Западной Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. вып. 5. С. 15–21. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10502>
20. Сурмач Г.П. Водная эрозия и борьба с ней. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 254 с.
21. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 176 с.
22. Чалов С.Р., Школьный Д.И., Промахова Е.В., Леман В.Н., Романченко А.О. Формирование стока наносов в районах разработок россыпных месторождений // География И Природные Ресурсы. 2015. вып. 2. С. 22–30.
23. Чебоचाков Е.Я., Муртаев В.Н. Современное состояние использования пахотных земель в хозяйствах разных форм собственности приенисейской Сибири // Вестник КрасГАУ. 2021. Т. 2. вып. 167. С. 10–16.
24. Чумбаев А.С., Танасиенко А.А. Измерение и оценка эрозии почв в результате снеготаяния // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири / ред. Сычев В.Г., Мюллер Л. Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. С. 224–228. <https://doi.org/10.25680/7597.2018.78.77.145>
25. Швец Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 184 с.
26. Шынбергенов Е.А., Ермолаев О.П. Потенциальная эрозия почв бассейна Р. Лена // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2017. Т. 27. вып. 4. С. 513–528.
27. Щеглова О.П. Формирование стока взвешенных наносов и смыв с горной части Средней Азии // Тр. СреднеазНИГМИ. 1972. вып. 60/75. С. 228.
28. Global Soil Partnership endorses guidelines on sustainable soil management | Global Soil Partnership | Food and Agriculture Organization of the United Nations [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/416516/>.
29. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/lsem.html>.
30. Эрозионные процессы центрального Ямала / ред. Сидорчук А.Ю., Баранов А.В. Спб., 1999. 350 с.
31. FAO. Crops Production [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
32. Эрозионно-руслевые системы / ред. Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
33. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // International Soil and Water Conservation Research. 2019. V. 7. № 3. P. 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
34. Alewell C., Meusburger K., Juretzko G., Mabit L., Ketterer M.E. Suitability of ²³⁹⁺²⁴⁰Pu and ¹³⁷Cs as tracers for soil erosion assessment in mountain grasslands // Chemosphere. 2014. V. 103. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.016>
35. Atoma H., Suryabhagavan K. V., Balakrishnan M. Soil erosion assessment using RUSLE model and GIS in Huluka watershed, Central Ethiopia // Sustainable Water Resources Management. 2020. V. 6. № 1. P. 12. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00365-z>
36. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates // Hydrology and Earth System Sciences. 2018. V. 22. № 11. P. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
37. GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report. 2011.
38. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K. Van, Montanarella L., Panagos P. An assessment of

- the global impact of 21st century land use change on soil erosion // *Nature Communications*. 2017. V. 8. № 1. P. 2013.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
39. *Bosco C., Rigo D. De, Dewitte O., Poesen J., Panagos P.* Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. V. 15. № 2. P. 225–245.
<https://doi.org/10.5194/nhess-15-225-2015>
40. *Chadli K.* Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco) // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016. V. 2. № 2. P. 51.
<https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>
41. *Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A.V., Promakhova E. V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N.* Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China // *Environmental Earth Sciences*. 2018. V. 77. № 7. P. 274. :
<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7448-9>
42. *Chalov S.R., Tsyplenkov A.S.* Testing soil erosion model for large river basins: Lena river // 3rd International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers 18-21 April 2017, New Delhi, India. New Delhi, 2017.
43. *Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böchner J.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geoscientific Model Development*. 2015. V. 8. № 7. P. 1991–2007.
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
44. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. 2011. 26 p.
45. *Desmet P., Govers G.* A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. V. 51. № 5. P. 427–433.
46. *Desmet P.J.J., Govers G.* GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information // *Catena*. 1995. V. 25. № 1–4. P. 389–401.
47. *Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Noël G.E., Teisserenc R., Probst J.L., Pérez J.M.S.* Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic ocean: The case of the Yenisei River basin // *Water Research*. 2019. V. 158. P. 118–135.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.018>
48. Viewfinder Panoramas [Электронный ресурс] / Ferranti J. de. Режим доступа: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html>.
49. *Fu B., Liu Y., Lü Y., He C., Zeng Y., Wu B.* Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China // *Ecological Complexity*. 2011. V. 8. № 4. P. 284–293.
<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.07.003>
50. *Gayen A., Saha S., Pourghasemi H.R.* Soil erosion assessment using RUSLE model and its validation by FR probability model // *Geocarto International*. 2020. V. 35. № 15. P. 1750–1768.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1581272>
51. *Griffin M.L., Beasley D.B., Fletcher J.J., Foster G.R.* Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units // *Journal of soil and water conservation*. 1988. V. 43. № 4. P. 326–331.
52. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. № 6160. P. 850–853.
<https://doi.org/10.1126/science.1244693>
53. *Hengl T., Jesus J.M.De, MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M.* Correction: SoilGrids1km – Global Soil Information Based on Automated Mapping // *PLoS ONE*. 2014. V. 9. № 12. P. e114788.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114788>
54. *Jazouli A. El, Barakat A., Ghafiri A., Moutaki S. El, Ettaqy A., Khellouk R.* Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco) // *Geoscience Letters*. 2017. V. 4. № 1. P. 25.
<https://doi.org/10.1186/s40562-017-0091-6>
55. *Kinnell P.I.A.* Discussion: Misrepresentation of the USLE in ‘Is sediment delivery a fallacy?’ // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008. V. 33. № 10. P. 1627–1629.
<https://doi.org/10.1002/esp.1629>
56. Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 19022EN, 1999. 58 p.

57. *Lehner B., Grill G.* Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. V. 27. № 15. P. 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
58. *McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K., Meyer L.D.* Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation // *Trans. ASAE*. 1987. V. 30. № 5. P. 1387–1396.
59. *Melkonian A.K., Willis M.J., Pritchard M.E., Stewart A.J.* Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 174. P. 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.001>
60. *Meusburger K., Konz N., Schaub M., Alewell C.* Soil erosion modelled with USLE and PESERA using QuickBird derived vegetation parameters in an alpine catchment // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. V. 12. № 3. P. 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.004>
61. *Nachtergaele F., Velthuisen H. Van, Verelst L.* Harmonized world soil database // *Food and Agriculture ...* 2008. P. 43.
62. *Nearing M.A.* A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. V. 61. № 3. P. 917–919.
63. *Olorunfemi I.E., Komolafe A.A., Fasinnirin J.T., Olufayo A.A., Akande S.O.* A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models // *CATENA*. 2020. V. 194. P. 104725. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725>
64. *Oost K. Van, Govers G., Cerdan O., Thauré D., Rompaey A. Van, Steegen A., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J.* Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets // *CATENA*. 2005. V. 61. № 2–3. P. 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.001>
65. *Ozcan A.U., Erpul G., Basaran M., Erdogan H.E.* Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Çankırı, Turkey // *Environmental Geology*. 2008. V. 53. № 8. P. 1731–1741. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0779-6>
66. *Panagos P. et al.* Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. № 1. P. 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
67. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K.* A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water // *Geosciences*. 2015. V. 5. P. 117–126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
68. *Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., Montanarella L.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale // *Land Use Policy*. 2015. V. 48. P. 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
69. *Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C.* The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // *Environmental Science and Policy*. 2015. V. 54. № August. P. 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
70. *Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M.* Is sediment delivery a fallacy? // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2006. V. 31. № 10. P. 1325–1328. <https://doi.org/10.1002/esp.1395>
71. *Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M.* Is sediment delivery a fallacy? Reply // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008. V. 33. № 10. P. 1630–1631. <https://doi.org/10.1002/esp.1627>
72. *Pietroni J., Chalov S.R., Chalova A.S., Alekseenko A.V., Jarsjö J.* Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin // *Catena*. 2017. V. 152. P. 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
73. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020.
74. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) // *Agricultural Handbook* № 703. 1997. P. 404. <https://doi.org/DC0-16-048938-5 65-100>
75. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P.* RUSLE: revised universal soil loss equation // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1991. V. 46. № 1. P. 30–33.
76. Validation of soil erosion risk assessments in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 20676 EN, 2003. 25 p.
77. *Schönbrodt S., Saumer P., Behrens T., Seeber C., Scholten T.* Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China // *Jour-*

- nal of Earth Science. 2010. V. 21. № 6. P. 835–845.
<https://doi.org/10.1007/s12583-010-0135-8>
78. *Shrestha N.K., Wang J.* Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate // *Science of The Total Environment*. 2018. V. 625. P. 1030–1045.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.347>
 79. *Syvitski J.P.M., Milliman J.D.* Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean // *Journal of Geology*. 2007. № 115. P. 1–19.
 80. *Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S.* Limitations Posed by Free DEMs in Watershed Studies: The Case of River Tanaro in Italy // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. № May.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00141>
 81. *Tsyplenkov A.S., Shynbergenov E.A., Chalov S.R., Ermolaev O.P.* Spatio-temporal assessment of soil erosion and sediment yield for a large river basin // *The Second International Young Scientists Forum on Soil and Water Conservation and ICCE symposium 2018 “Climate Change Impacts on Sediment Dynamics: Measurement, Modelling and Management”*. Moscow, 2018.
 82. *Turowski J.M., Rickenmann D., Dadson S.J.* The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: A review of empirical data // *Sedimentology*. 2010. V. 57. № 4. P. 1126–1146.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
 83. *Vente J. de, Poesen J.* Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models // *Earth-Science Reviews*. 2005. V. 71. № 1–2. P. 95–125.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
 84. *Williams J.R.* Chapter 25: The EPIC model. // *Computer models of watershed hydrology* / ed. Singh V.P. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995. P. 909–1000.
 85. *Wilson J.P.* Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds // *Journal of soil and water conservation*. 1986. V. 41. № 3. P. 179–184.
 86. *Wischmeier W.H., Smith D.D., Umland R.E.* Evaluation of factors in the soil loss equation // *Agricultural Engineering*. 1958. V. 39. № 8. P. 458–462.
 87. *Wu S., Li J., Huang G.* An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models // *Environmental Modeling & Assessment*. 2005. V. 10. № 1. P. 33–42.
<https://doi.org/10.1007/s10666-004-6595-4>
 88. *Zingg A.W.* Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff // *Agric. Engineering*. 1940. V. 21. P. 59–64.
 89. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. Москва: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.

Assessment of Basin-Scale Soil Erosion within the Largest Siberian Rivers

A. S. Tsyplenkov¹, *, S. R. Chalov¹, **, and G. L. Shinkareva¹, ***

¹*Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

**E-mail: atsyplenkov@gmail.com*

***E-mail: srchalov@gmail.com*

****E-mail: galina.shinkareva@gmail.com*

Abstract—In this paper, we assessed soil erosion within the largest river basins of the Russian Federation (Ob, Yenisei, Lena, Yana, Indigirka, Kolyma). Soil losses have been estimated with RUSLE based on the digital elevation model of the maximum available resolution (~90 × 90 m). The results are compared with existing global estimates and previous studies for the Russian territory. The conclusion was made about high uncertainty of small-scale erosion estimates made on a subcontinental scale, which is explained by the high sensitivity of RUSLE to the parameterization of the length and steepness of slopes. In the sublatitudinal direction, for all basins there is an increase in erosion from north to south, corresponding to the general strengthening of agricultural land use. Based on comparison with the suspended sediment yield, the conclusion was made about an exceptionally accumulative regime of the considered watersheds: more than 90% of sediments do not reach the estuaries of the rivers.

Keywords: soil erosion, universal soil loss equation, Arctic, sediment yield

REFERENCES

1. Alekseevskij N.I. Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov. Moskva: Geograficheskij fakul'tet MGU Moskva, 1998. 202 s.
2. Bazhenova O.I. Zakonomernosti dvizhenija ryhlogo materiala na lesostepnyh sklonah v Nazarovskoj vpadine (po rezul'tatam stacionarnyh nabljudenij) // Geografija i prirodnye resursy. 1988. S. 53–73.
3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupjan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrodiametra MODIS // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2011. T. 8. vyp. 4. S. 285–302.
4. Beljaev Ju.R., Harchenko S.V., Romanenko F.A., Eremenko E.A., Matlahova E.Ju. Antropogennaja transformacija rel'efa Arkticheskoj zony Rossii: hronologija, geografija, intensivnost' // Rel'ef i četvertichnye obrazovanija Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii. Materialy ezhegodnoj konferencii po rezul'tatam jekspedicionnyh issledovanij. VNIIOkeangeologija/AANII Sankt-Peterburg, 2020. S. 18–23.
<https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10702>
5. Bredihin A.V., Eremenko E.A., Harchenko S.V., Beljaev Ju.R., Romanenko F.A., Bolysov S.I., Fuzina Ju.N. Rajonirovanie Rossijskoj Arktiki po tipam antropogennogo osvoenija i sopustvujushhej transformacii rel'efa na osnove klasternogo analiza // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5. Geografija. 2020. vyp. 1. S. 42–56.
6. Vol'nov V.V., Bojko A.V., Chichkarev A.S. Opyt ispol'zovanija protivjerozionnyh gidrotehnickeskikh sooruzhenij v bor'be so stokom talyh vod i smyvom pahotnyh pochv na sklonovyh zemljah Altajskogo kraja // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017.
7. Golosov V.N. Jerozionno-akkumuljativnye processy v rechnyh bassejnah osvoennyh ravnin. GEOS Moskva, 2006.
8. Golosov V.N., Larionov G.A., Sidorchuk A.Ju. Istoricheskij jetap v osvoenii jerozionno-ruslovyh sistem // Jerozionno-ruslovyje sistemy / red. Chalov R.S., Golosov V.N., Sidorchuk A.Ju. M., 2017. S. 702.
9. Gusarov A.V. Opredelenie minimal'noj prodolzhitel'nosti rjada nabljudenij za stokom vzveshennyh nanosov s cel'ju korrektnoj ocenki prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti intensivnosti jerozii v ih bassejnah // Geomorfologija. 2017. vyp. 1. S. 19–29.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-1-19-29>
10. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. Jerozija i stok nanosov na Zemle. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo Universiteta, 1984. 264 s.
11. Evseeva N.S. Sovremennij morfolitogenez jugo-vostoka Zapadno-Sibirskoj ravniny. Tomsk: Izd-vo NTL, 2009. 484 s.
12. Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Kashiro M.A., Osinceva N.V., Aleev V.V. Kolichestvennaja ocenka smyva pochv v agrolandshaftah juzhnoj tajgi // Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernyh vzaimodejstvij v pochvah i pochvennom pokrove. sbornik materialov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvjashhennoj 85-letiju kafedry pochvovedenija i jekologii pochv TGU. Tomsk: NI TGU, 2015. S. 185–189.
13. Evseeva N.S., Kvasnikova Z.N., Ljudkevich E.I. Jerozionnye processy v prirodno-antropogennyh geosistemah juzhnoj tajgi Zapadno-Sibirskoj ravniny i ih geojekologicheskie aspekty // Geojekologija, inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija. 2014. vyp. 5. S. 442–449.
14. Ivanov V.V., Chalov S.R. Ocenka stoka i sostava nanosov r. Ob' // Zakonomernosti projavlenija jerozionnyh i ruslovyh processov v razlichnyh prirodnyh uslovijah. Materialy V Sserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. M., 2019. S. 219–222.
15. Larionov G.A. Jerozija i defljacija pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye ocenki. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, 1993. 200 s.
16. Liseckij F.N., Svetlichnyj A.A., Chernyj S.G. Sovremennye problemy jeroziovedenija / red. Svetlichnyj A.A. Belgorod: Konstanta, 2012. 456 s.
17. Lysanova G.I., Sorokovoj A.A. Potencial zemel'nyh resursov regionov Sibiri // Geografija i Prirodnye Resursy. 2015. vyp. 2. S. 149–155.
18. Magrickij D.V. Godovoj stok vzveshennyh nanosov rossijskih rek vodosbora Severnogo Ledovitogo okeana i ego antropogennye izmenenija // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija. 2010. vyp. 6. S. 17–24.
19. Savel'eva D.A., Kalichkin V.K. Vnutrisezonnyj monitoring vodnoj jerozii pochv pashni v podtajze Zapadnoj Sibiri // Dostizhenija nauki i tehniki APK. 2021. T. 35. vyp. 5. S. 15–21.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10502>
20. Surmach G.P. Vodnaja jerozija i bor'ba s nej. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 254 s.
21. Tanasienko A.A. Specifika jerozii pochv v Sibiri. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2003. 176 s.

22. Chalov S.R., Shkol'nyj D.I., Promahova E.V., Leman V.N., Romanchenko A.O. Formirovanie stoka nanosov v rajonah razrabotok rossypanyh mestorozhdenij // *Geografija i Prirodnye Resursy*. 2015. vyp. 2. S. 22–30.
23. Chebochakov E.Ja., Murtaev V.N. Sovremennoe sostojanie ispol'zovanija pahotnyh zemel' v hozjajstvah raznyh form sobstvennosti prienisejskoj Sibiri // *Vestnik KrasGAU*. 2021. T. 2. vyp. 167. S. 10–16.
24. Chumbaev A.S., Tanasienko A.A. Izmerenie i ocenka jerozii pochv v rezul'tate snegotajaniya // *Novye metody i rezul'taty issledovanij landshaftov v Evrope, Central'noj Azii i Sibiri* / red. Sychev V.G., Mjuller L. Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut agrohimii imeni D.N. Prjanishnikova, 2018. S. 224–228. doi: 10.25680/7597.2018.78.77.145
25. Shvebs G.I. Formirovanie vodnoj jerozii, stoka nanosov i ih ocenka. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. 184 s.
26. Shynbergenov E.A., Ermolaev O.P. Potencial'naja jerozija pochv bassejna R. Lena // *Vest. Udmurt. un-ta. Ser. Biologija. Nauki o Zemle*. 2017. T. 27. vyp. 4. S. 513–528.
27. Shheglova O.P. Formirovanie stoka vzveshennyh nanosov i smyv s gornoj chasti Srednej Azii // *Tr. SredneazNIGMI*. 1972. vyp. 60/75. S. 228.
28. Global Soil Partnership endorses guidelines on sustainable soil management | Global Soil Partnership | Food and Agriculture Organization of the United Nations [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/416516/>.
29. Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1sem.html>.
30. Jerozionnye processy central'nogo Jamala / red. Sidorchuk A.Ju., Baranov A.V. Spb., 1999. 350 s.
31. FAO. Crops Production [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
32. Jerozionno-ruslovyje sistemy / red. Chalov R.S., Golosov V.N., Sidorchuk A.Ju. M.: INFRA-M, 2017. 702 s.
33. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. Vol. 7. № 3. P. 203–225. doi: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004
34. Alewell C., Meusburger K., Juretzko G., Mabit L., Ketterer M.E. Suitability of ²³⁹⁺²⁴⁰Pu and ¹³⁷Cs as tracers for soil erosion assessment in mountain grasslands // *Chemosphere*. 2014. Vol. 103. P. 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.016>
35. Atoma H., Suryabhadgavan K. V., Balakrishnan M. Soil erosion assessment using RUSLE model and GIS in Huluka watershed, Central Ethiopia // *Sustainable Water Resources Management*. 2020. Vol. 6. № 1. P. 12. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00365-z>
36. Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. № 11. P. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
37. GLOBCOVER 2009 Products Description and Validation Report. 2011.
38. Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K. Van, Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. № 1. P. 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
39. Bosco C., Rigo D. De, Dewitte O., Poesen J., Panagos P. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. Vol. 15. № 2. P. 225–245. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-225-2015>
40. Chadli K. Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco) // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016. Vol. 2. № 2. P. 51. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>
41. Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A. V., Promakhova E. V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N. Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China // *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77. № 7. P. 274. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7448-9>
42. Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Testing soil erosion model for large river basins: Lena river // 3rd International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers 18–21 April 2017, New Delhi, India. New Delhi, 2017.

43. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. № 7. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
44. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. 2011. 26 p.
45. Desmet P., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. Vol. 51. № 5. P. 427–433.
46. Desmet P.J.J., Govers G. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information // *Catena*. 1995. Vol. 25. № 1–4. P. 389–401.
47. Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Noël G.E., Teisserenc R., Probst J.L., Pérez J.M.S. Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic ocean: The case of the Yenisei River basin // *Water Research*. 2019. Vol. 158. P. 118–135. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.018>
48. Viewfinder Panoramas [Электронный ресурс] / Ferranti J. de. Режим доступа: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html>.
49. Fu B., Liu Y., Lü Y., He C., Zeng Y., Wu B. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China // *Ecological Complexity*. 2011. Vol. 8. № 4. P. 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.07.003>
50. Gayen A., Saha S., Pourghasemi H.R. Soil erosion assessment using RUSLE model and its validation by FR probability model // *Geocarto International*. 2020. Vol. 35. № 15. P. 1750–1768. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1581272>
51. Griffin M.L., Beasley D.B., Fletcher J.J., Foster G.R. Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units // *Journal of soil and water conservation*. 1988. Vol. 43. № 4. P. 326–331.
52. Hansen M.C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. Vol. 342. № 6160. P. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
53. Hengl T., Jesus J.M. De, MacMillan R.A., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M. Correction: Soil-Grids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9. № 12. P. e114788. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114788>
54. Jazouli A. El, Barakat A., Ghafiri A., Moutaki S. El, Ettaqy A., Khellouk R. Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco) // *Geoscience Letters*. 2017. Vol. 4. № 1. P. 25. <https://doi.org/10.1186/s40562-017-0091-6>
55. Kinnell P.I.A. Discussion: Misrepresentation of the USLE in ‘Is sediment delivery a fallacy?’ // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008. Vol. 33. № 10. P. 1627–1629. doi: 10.1002/esp.1629
56. Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 19022EN, 1999. 58 p.
57. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world’s large river systems // *Hydrological Processes*. 2013. Vol. 27. № 15. P. 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
58. McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K., Meyer L.D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation // *Trans. ASAE*. 1987. Vol. 30. № 5. P. 1387–1396.
59. Melkonian A.K., Willis M.J., Pritchard M.E., Stewart A.J. Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 174. P. 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.001>
60. Meusburger K., Konz N., Schaub M., Alewell C. Soil erosion modelled with USLE and PESERA using QuickBird derived vegetation parameters in an alpine catchment // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. Vol. 12. № 3. P. 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.004>
61. Nachtergaele F., Velthuisen H. Van, Verelst L. Harmonized world soil database // *Food and Agriculture ...*. 2008. P. 43.
62. Nearing M.A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. Vol. 61. № 3. P. 917–919.

63. Olorunfemi I.E., Komolafe A.A., Fasinmirin J.T., Olufayo A.A., Akande S.O. A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models // CATENA. 2020. Vol. 194. P. 104725.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725>
64. Oost K. Van, Govers G., Cerdan O., Thauré D., Rompaey A. Van, Steegen A., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J. Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets // CATENA. 2005. Vol. 61. № 2–3. P. 105–121.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.001>
65. Ozcan A.U., Erpul G., Basaran M., Erdogan H.E. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Çankırı, Turkey // Environmental Geology. 2008. Vol. 53. № 8. P. 1731–1741.
<https://doi.org/10.1007/s00254-007-0779-6>
66. Panagos P. et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. № 1. P. 4175.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
67. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water // Geosciences. 2015. Vol. 5. P. 117–126.
<https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
68. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E., Montanarella L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale // Land Use Policy. 2015. Vol. 48. P. 38–50.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
69. Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // Environmental Science and Policy. 2015. Vol. 54. № August. P. 438–447.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
70. Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M. Is sediment delivery a fallacy? // Earth Surface Processes and Landforms. 2006. Vol. 31. N 10. P. 1325–1328.
<https://doi.org/10.1002/esp.1395>
71. Parsons A.J., Wainwright J., Brazier R.E., Powell D.M. Is sediment delivery a fallacy? Reply // Earth Surface Processes and Landforms. 2008. Vol. 33. № 10. P. 1630–1631.
<https://doi.org/10.1002/esp.1627>
72. Pietroń J., Chalov S.R., Chalova A.S., Alekseenko A.V., Jarsjö J. Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin // Catena. 2017. Vol. 152. P. 82–93.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
73. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020.
74. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) // Agricultural Handbook No. 703. 1997. P. 404.
<https://doi.org/10.1002/esp.1395>
75. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P. RUSLE: revised universal soil loss equation // Journal of Soil and Water Conservation. 1991. Vol. 46. № 1. P. 30–33.
76. Validation of soil erosion risk assessments in Italy. European Soil Bureau Research Report No. EUR 20676 EN, 2003. 25 p.
77. Schönbrodt S., Saumer P., Behrens T., Seeber C., Scholten T. Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China // Journal of Earth Science. 2010. Vol. 21. № 6. P. 835–845.
<https://doi.org/10.1007/s12583-010-0135-8>
78. Shrestha N.K., Wang J. Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 625. P. 1030–1045.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.347>
79. Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean // Journal of Geology. 2007. № 115. P. 1–19.
80. Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S. Limitations Posed by Free DEMs in Watershed Studies: The Case of River Tanaro in Italy // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. № May.
<https://doi.org/10.3389/feart.2019.00141>
81. Tsyplenkov A.S., Shynbergenov E.A., Chalov S.R., Ermolaev O.P. Spatio-temporal assessment of soil erosion and sediment yield for a large river basin // The Second International Young Scientists Forum on Soil and Water Conservation and ICCE symposium 2018 “Climate Change Impacts on Sediment Dynamics: Measurement, Modelling and Management”. Moscow, 2018.

82. Turowski J.M., Rickenmann D., Dadson S.J. The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: A review of empirical data // *Sedimentology*. 2010. Vol. 57. N 4. P. 1126–1146.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
83. Vente J. de, Poesen J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models // *Earth-Science Reviews*. 2005. Vol. 71. № 1–2. P. 95–125.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
84. Williams J.R. Chapter 25: The EPIC model. // *Computer models of watershed hydrology* / ed. Singh V.P. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1995. P. 909–1000.
85. Wilson J.P. Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds // *Journal of soil and water conservation*. 1986. Vol. 41. № 3. P. 179–184.
86. Wischmeier W.H., Smith D.D., Uhland R.E. Evaluation of factors in the soil loss equation // *Agricultural Engineering*. 1958. Vol. 39. № 8. P. 458–462.
87. Wu S., Li J., Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models // *Environmental Modeling & Assessment*. 2005. Vol. 10. № 1. P. 33–42.
<https://doi.org/10.1007/s10666-004-6595-4>
88. Zingg A.W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff // *Agric. Engineering*. 1940. Vol. 21. P. 59–64.
89. Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skoxozyajstvennyh zemel' Rossii*. Moskva: IKC "Akademkniga", 2002. 255 s.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА GMTED2010 ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭРОЗИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА (НА ПРИМЕРЕ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ)

© 2022 г. К. А. Мальцев*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

**E-mail: mlevkirill@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.06.2022 г.

После доработки 06.12.2022 г.

Принята к публикации 08.12.2022 г.

В статье представлен количественный анализ отличий расчета эрозионного потенциала рельефа возникающих при использовании различных вариантов глобальной цифровой модели рельефа GMTED2010: “Mean”; “Breakline emphasis”; “Median”. Для сравнительного анализа в качестве эталона использовалась глобальная цифровая модель рельефа SRTM (радар C-SIR). Кроме этого, выполнен анализ отличий величины эрозионного потенциала рельефа, возникающих при использовании различных методик. При этом были использованы 4 методики расчета эрозионного потенциала рельефа: USLE; RUSLE; методика научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов (НИЛЭП и РП) МГУ, методика Мура И.Д. и Найбера Дж.Л. Анализ был выполнен в пределах 4 тестовых участков отражающих основные типы рельефа юга Европейской территории России. Установлено, что наиболее близкие к модели SRTM C-SIR результаты при расчете эрозионного потенциала рельефа дает вариант модели GMTED2010 “MEAN”. Ошибки, возникающие при сравнении моделей SRTM C-SIR и GMTED2010 “MEAN” в пределах умеренно расчлененных равнин, где расположена большая часть пахотных угодий, составляют 7–54%. В то же время ошибки в пределах горных территорий или пластово-аккумулятивных равнин и низменностей составляют 68–322%. Анализ использования различных формул расчета эрозионного потенциала рельефа показывает, что в пределах всех тестовых участков наименьшие значения получаются при использовании методики, предложенной НИЛЭП и РП, а наибольшие значения с использованием USLE, либо с использованием методики предложенной Муром И.Д. и Найбером Дж.Л.

Ключевые слова: эрозионный потенциал рельеф, ГИС, ЦМР, GMTED2010, SRTM

DOI: 10.31857/S0869607122050068

ВВЕДЕНИЕ

Среднемноголетняя количественная оценка интенсивности эрозионных и аккумулятивных процессов на водосборе, а также оценка величины стока наносов с водосбора в реку являются одними из ключевых показателей для определения темпов деградации почвы на водосборе и степени загрязнения водотоков наносами, поступающими с площади их водосборов.

Проблема количественной оценки и картографирования эрозионно-аккумулятивных процессов актуальна для Европейской территории России (ЕТР) и особенно для ее южной части (южнее 55–60° с.ш.) в силу того, что именно здесь на плодородных

почвах уже несколько столетий находится земледельческий пояс России. В этой связи количественная оценка эрозионно-аккумулятивных процессов является актуальной задачей. Задача оценки потерь почвы может быть решена с использованием самых разнообразных полевых методов и методов моделирования. В качестве одного из подходов к такой оценке можно использовать эрозионные модели. В настоящее время существует множество таких моделей: НИЛЭП и РП МГУ [4], USLE [29], RUSLE [23], WATEM/SEDEM [28], RUSLE2 [14] и другие. С использованием этих моделей и не только, к настоящему времени разработано несколько разновременных карт, отражающих либо степень деградации почвенного покрова от эрозионных процессов, либо интенсивность протекания эрозионных процессов на пашне в пределах ЕТР, как составной части более крупных территорий:

- Почвенно-эрозионная карта СССР [8];
- Национальный атлас почв Российской Федерации [5];
- The map of spatial variation of soil erosion by water [27];
- Global Land Degradation Information System (GLADIS) [21].

Обзор данных картографических моделей представлен в статьях [17, 19]. В то же время, на наш взгляд, остается довольно много вопросов методического характера о том, как рассчитывать потенциальные потери почвы при рассмотрении таких крупных территорий как ЕТР. Согласно многим исследованиям, потери почвы обусловлены несколькими факторами: эрозионным потенциалом дождей осадков; смываемостью почв; эрозионным потенциалом рельефа (ЭПР), почвозащитным коэффициентом агрокультурной растительности. В данном исследовании мы бы хотели остановиться на вопросах методического обеспечения расчета ЭПР. Здесь, на наш взгляд, существует два важных методических аспекта: во-первых, то какую цифровую модель рельефа использовать для расчета эрозионного потенциала рельефа и то, какую методику использовать для расчета эрозионного потенциала рельефа. Вопрос использования ЦМР во многом зависит от масштаба исследования, при работе с такими большими территориями как ЕТР невозможно обойтись без свободно распространяемых глобальных цифровых моделей рельефа (ГЦМР). В настоящее время существует несколько разномасштабных ГЦМР.

Хороший обзор и оценку точности таких наиболее детальных ГЦМР существующих в свободном доступе, как SRTM C-SIR, SRTM X-SAR; AW3D30, ASTER GDEM и других дан во многих статьях [1, 7, 10, 11, 24]. Однако выше перечисленные ГЦМР, имеющие шаг сетки 1" (около 30 м.), сложно использовать при исследованиях таких крупных территорий как вся ЕТР (около 3.5 млн км²), в силу большого объема обрабатываемых данных. Количество узлов регулярной сетки при шаге 30 м будет составлять около 4×10^9 , а размер файла при представлении рельефа ЕТР составлял бы 12–13 Гигабайт. Просто для отображения карт такой размер файла не является очень большой проблемой, хотя и здесь требуются вычислительные мощности рабочей станции. Однако для вычисления ЭПР над ЦМР необходимо проведение некоторых подготовительных процедур. Например, требуется гидрологическая подготовка рельефа, заключающаяся в удалении всех локальных западин, существующих в модели рельефа [18].

Наиболее подходящей альтернативной ГЦМР для оценки фактора рельефа всей Европейской территории России является, на наш взгляд, модель "Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010" (GMTED2010) [15]. Данная ГЦМР была создана в 2010 году и представляет собой компиляцию нескольких глобальных наборов данных. Оценка точности высот и морфометрических показателей полученных на основе GMTED2010 в настоящий момент не так много. Можно упомянуть исследования проведенные в различных частях мира [13, 25, 26]. Количественный анализ точности модели GMTED2010 проведенный на ЕТР в основном были направлены на оценку точности положения границ водосборов [2], а не на оценку погрешности ЭПР.

Кроме этого в настоящее время существует несколько методик расчета ЭПР, анализ влияния которых на потенциальные потери почвы в пределах различных типов рельефа ЕТР также не проводился.

Соответственно, задачами исследования являются:

- 1) Количественная оценка различий эрозионного потенциала рельефа возникающих при его расчете на основе существующих вариантов ГЦМР GMTED2010;
- 2) Количественная оценка различий возникающих при расчете эрозионного потенциала рельефа разными методиками в пределах основных типов рельефа юга ЕТР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Модель "GMTED2010" имеет несколько версий отличающихся как пространственным разрешением (7.5", 15", 30"), так и алгоритмами предобработки использующихся для ее создания данных ("Min"; "Max"; "Mean"; "Median"; "Standart Deviation"; "Systematic Subsample"; "Breakline Emphasys"). Эта модель была создана с использованием 11-ти различных источников данных о рельефе Земли, в том числе SRTM (данные радара C-SIR) для территорий южнее 60° с.ш. и цифровых данных о высотах, полученных с использованием фотограмметрии при разрешении 100 м для территорий севернее 60° с.ш. Для дальнейшего анализа были использованы версии модели, имеющие пространственное разрешение 7.5" и имеющие алгоритмы предобработки: "Mean"; "Median"; "Breakline Emphasys". В качестве проверочной модели была использована версия модели SRTM полученная радаром C-SIR и имеющая шаг сетки 1".

Влияние различных версий модели GMTED2010 на величину ЭПР было оценено на 4 тестовых участках каждый площадью около 40 тыс. км² и расположенных в пределах различных геоморфологических районов южной части ЕТР (рис. 1):

"test1" – северная оконечность Приволжско-Ставропольской провинции молодых поднятий, Волго-Камская провинция низменных и возвышенных равнин, а также ярусных возвышенностей, Заволжская низменная аккумулятивная равнина сложного плиоценового прогиба;

"test2" – провинция высокогорных, среднегорных и низкогорных линейных хребтов Большого Кавказа с тектоническим блоком и эрозионно-денудационным рельефом;

"test3" – Понто-Каспийской провинции пластово-аккумулятивных равнин и низменностей;

"test4" – Окско-Донская аккумулятивная равнина [6].

В пределах тестовых участков 1–4 (рис. 1) были рассчитаны значения эрозионного потенциала рельефа с использованием различных методик. В настоящее время существует несколько методик оценки ЭПР, довольно хороший обзор этих методик дан в статье [22]. Однако среди всех этих методов существует 4 методики, которые, наиболее часто [12] используются как в отечественных исследованиях, так и за рубежом: методика RUSLE [23]; [15]; USLE [29]; методика НИЛЭП и РП МГУ [4]; методика И.Д. Мура и Дж.Л. Нибера [20].

Необходимо отметить, что оценка эрозионного потенциала рельефа в пределах различных частей ЕТР проводилась как авторами данного исследования, так и другими авторами [3]. Кроме этого необходимо отметить, что различными исследователями в пределах, в том числе Европейской территории России, ранее проводился анализ эффективности использования различных методик в пределах отдельных регионов. Однако таких исследований немного, так, например, необходимо отметить исследования сотрудников Белгородского университета [9], которые носят региональный характер.

Для расчетов ЭПР с использованием трех методик было использовано программное обеспечение SAGA. Программная реализация методики расчета ЭПР, предложенной

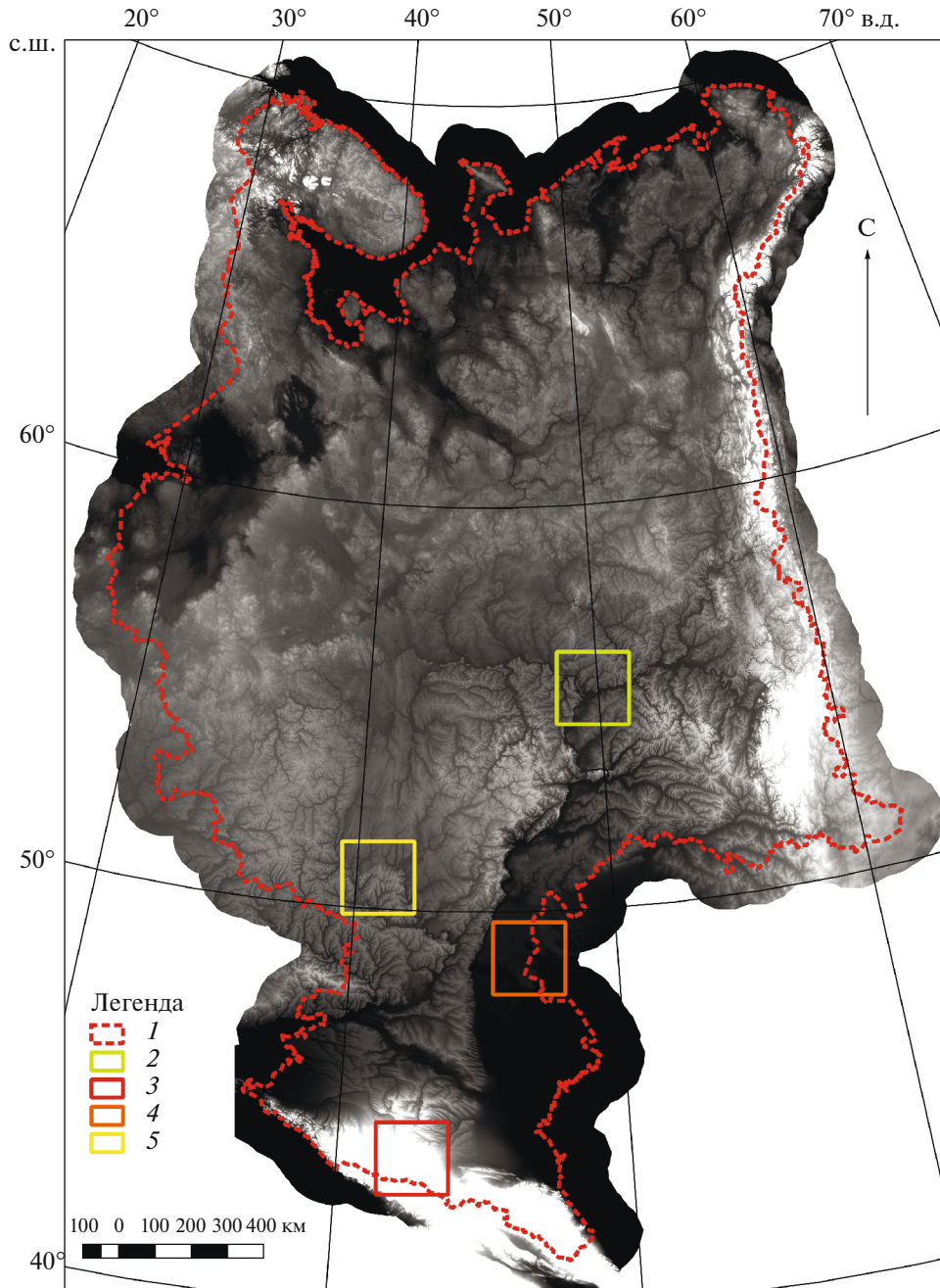


Рис. 1. Обзорная карта расположения тестовых участков (1 – граница Европейской территории России; 2 – тестовый участок “test1”; 3 – тестовый участок “test2”; 4 – тестовый участок “test3”; 5 – тестовый участок “test4”).

Fig. 1. Overview map of the location of test areas (1—border of the European territory of Russia; 2—test area “test1”; 3—test area “test2”; 4—test area “test3”; 5—test area “test4”).

Таблица 1. Статистические показатели ЭПР рассчитанные различными методиками
Table 1. Statistical indicators of LS-factor calculated by various methods

Методика	Среднее	Стандартное отклонение	Максимум	Медиана	99% – квантиль
Участок “test1”					
RUSLE	0.6001	0.8576	23.1891	0.3583	4.1214
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	1.1375	1.6101	40.3791	0.6240	7.698
USLE	0.9776	1.8025	71.0737	0.3931	8.4269
Ларионов, 1993	0.4431	0.7936	20.1792	0.1390	3.8318
Участок “test2”					
RUSLE	11.1734	13.5347	122.409	3.9414	49.39
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	18.1684	23.3684	361.25	6.9563	95.84
USLE	33.2346	53.1262	1313.24	7.3064	229.749
Ларионов, 1993	10.1859	16.4261	98.5768	0.7004	62.9624
Участок “test3”					
RUSLE	0.0802	0.0802	11.1997	0.0631	0.3595
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	0.0726	0.1560	11.9156	0.0413	0.6279
USLE	0.1116	0.1164	14.3713	0.0969	0.3906
Ларионов, 1993	0.1023	0.1284	10.68	0.0345	0.4803
Участок “test4”					
RUSLE	0.6152	0.8018	15.1918	0.3218	3.9315
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	1.16	1.5763	36.3964	0.5597	7.3859
USLE	1.0089	1.6778	59.0437	0.3564	8.0167
Ларионов, 1993	0.3213	0.3358	5.6431	0.2058	1.7020

в НИЛЭП и РП Г.А. Ларионовым, была выполнена нами самостоятельно. Полученные растровые фрагменты были проанализированы с использованием методов описательной статистики. Были рассчитаны такие статистические показатели как: среднее; стандартное отклонение, максимум, медиана, 99% – квантиль. Объем выборки для всех тестовых участков был равен 1000000.

Кроме этого, был выполнен сравнительный анализ пар медиан. Были проанализированы пары медиан различных вариантов модели GMTED2010 между собой и вариантов модели GMTED2010 с моделью SRTM C-SIR по формуле 1.

$$ERR = (|M1 - M2| / M1) \times 100 \quad (1)$$

где, ERR – разница в процентах; M1 – медианное значение в модели GMTED; M2 – медианное значение в модели SRTM(C-SIR).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнительного анализа использования различных методик ЭПР в пределах различных тестовых участков представлены в табл. 1.

Анализ этой таблицы показывает, что наименьшие различия величины ЭПР в пределах ЕТР между методиками расчета наблюдаются на тестовом участке “test3”, который расположен в пределах Понто-Каспийской провинции пластово-аккумулятивных равнин и низменностей. Наибольшие различия величины ЭПР наблюдаются при использовании выбранных методик в пределах тестового участка представляющего возвышенные горные территории (“test2”).

При этом наименьшие значения ЭПР в пределах всех тестовых участков получают при использовании методики предложенной Г.А. Ларионовым. Максимальные значения ЭПР в пределах горных территорий северного Кавказа (“test2”) свойственны методике USLE [29], а в пределах умеренной равнины центра ЕТР (“test1”, “test4”) методике предложенной И.Д. Муром и Дж.Л. Найбером [20]. Кроме этого необходимо отметить, что наиболее близкие средние значения ЭПР наблюдаются между методикой Г.А. Ларионова (1993), а также методикой RUSLE [23, 16]. В то же время структура распределения ЭПР несколько отличается при использовании этих двух методик, о чем говорят медиана и 99% квантиль, а также стандартное отклонение. Так медианы значений ЭПР полученные этими двумя методиками различаются сильнее, чем средние значения, а 99% квантили различаются меньше, чем средние значения.

Здесь также хотелось бы отметить, что наибольшие значения стандартного отклонения, максимума и 99% квантили характерны для расчета ЭПР предложенного с использованием методики USLE на возвышенном участке “test2” и на равнинных участках “test1” и “test4”, что говорит о большей изменчивости значений ЭПР, получаемых этой методикой. На участке “test3”, который характеризуется низменным рельефом, наибольшие значения стандартного отклонения и 99% квантили, представлены в методике, описанной И.Д. Муром и Дж.Л. Найбером [20].

Для сравнительного анализа вариантов модели GMTED2010 была использована методика RUSLE. Использование различных вариантов модели GMTED2010 (“Mean”, “Median”, “Breakline emphasys”), может давать существенно различающиеся значения ЭПР. Так, например, различия в величине ЭПР между моделями “Breakline emphasys” и “Mean” могут достигать 18% (test1) – 60% (test3), в зависимости от тестового участка. Различия величины ЭПР между моделями “Mean” и “Median” намного меньше и не превышают 2% на участке “test2” (табл. 2). Анализ медиан показывает, что варианты модели “Mean” и “Median”, дают меньшие значения ЭПР, а вариант модели “Breakline emphasys” дает повышенную оценку. Схожие результаты дает анализ средних значений. Наибольшие значения на всех тестовых участках таких статистических показателей как стандартное отклонение, 99% квантиль, максимум, при использовании варианта модели “Breakline_emphasys” говорит о большем разбросе значений ЭПР. Все статистические показатели ЭПР на всех тестовых участках моделей “Mean” и “Median” очень схожи.

Анализ средних и медианных значений различных вариантов ГЦМР GMTED2010 и более точной ГЦМР SRTM (C-SIR) показывает, что в пределах участков “test1”, “test2”, “test4” наиболее близкие результаты к ГЦМР SRTM (C-SIR) дает вариант модели “MEAN” (табл. 2). В тоже время, на участке “test3” в условиях низменного рельефа наиболее близкий к модели SRTM (C-SIR) результат дает модель GMTED2010-“Breakline emphasys”. Также необходимо отметить, что все варианты модели “GMTED2010” далеко не на всех тестовых участках хорошо согласуются с моделью ГЦМР SRTM (C-SIR). Так, например, относительно небольшие различия (7–54%) характерны для тестовых участков, расположенных в пределах умеренно расчлененных равнин (“test1”, “test4”), где сосредоточены основные пахотные земли ЕТР. В тоже время, эти различия между величинами ЭПР рассчитанного в пределах горных территорий (“test2”) и пластово-аккумулятивных равнин и низменностей (“test3”) достигают 68–322%. Также необходимо отметить, что все варианты модели “GMTED2010”, на горных (“test2”) и равнинных (“test1”, “test4”) участках завышают значения ЭПР по сравнению с моделью SRTM (C-SIR). Все варианты модели “GMTED2010”, на низменных участках дают заниженные значения ЭПР по сравнению с моделью SRTM (C-SIR).

Анализ табл. 2 также показывает, что отличия ЭПР обусловленные использованием существующих вариантов модели GMTED2010 сопоставимы с отличиями, обусловленными разным шагом сетки в SRTM(C-SIR) и GMTED2010 в пределах умеренно расчлененных равнин (“test1”, “test4”). Отличия ЭПР обусловленные шагом сетки

Таблица 2. Статистические показатели ЭПР рассчитанные с использованием различных вариантов ГЦМР GMTED2010 и SRTM (C-SIR)**Table 2.** Statistical indicators of the LS-factor calculated using different variants of the GMTED2010

ГЦМР	Среднее	Стандартное отклонение	Максимум	Медиана	99% – квантиль
Участок “test1”					
GMTED_be	0.7374	1.0789	26.22	0.4241	5.32
GMTED_mn	0.6001	0.8576	23.1800	0.3585	4.12
GMTED_md	0.6121	0.9010	24.505	0.3592	4.3538
SRTM(C-SIR)	0.5385	0.6488	38.82	0.3356	3.36
Участок “test2”					
GMTED_be	12.7038	14.8869	172.78	4.9783	53.0600
GMTED_mn	11.1734	13.5347	122.409	3.9414	49.3900
GMTED_md	11.2832	13.6356	125.391	4.0230	49.6954
SRTM (C-SIR)	5.4018	7.1400	68.6760	2.3939	29.2800
Участок “test3”					
GMTED_be	0.1064	0.1031	13.9966	0.1014	0.4246
GMTED_mn	0.0802	0.0836	11.1997	0.06315	0.3595
GMTED_md	0.0815	0.0891	11.7263	0.06316	0.3676
SRTM (C-SIR)	0.2936	0.2189	22.96	0.2670	0.8972
Участок “test4”					
GMTED_be	0.7882	1.0527	18.0309	0.4189	5.3112
GMTED_mn	0.6152	0.8018	15.1918	0.3218	3.9300
GMTED_md	0.6285	0.8421	15.5465	0.3219	4.1709
SRTM (C-SIR)	0.5936	0.6312	25.6433	0.4961	3.3564

Примечание. GMTED_be – вариант “Breakline emphasis” ГЦМР GMTED2010 GMTED_mn – вариант “MEAN” ГЦМР GMTED2010 GMTED_md – вариант “MEDIAN” ГЦМР GMTED2010 SRTM (C-SIR) – ГЦМР шагом 1 угловая секунда полученная на основе данных “SRTM” радара C-SIR.

моделей SRTM(C-SIR) и GMTED2010 в пределах горных территорий (“test2”) и пластово-аккумулятивных равнин и низменностей (“test3”) много больше, чем отличия обусловленные использованием различных вариантов модели GMTED2010.

Поэтому мы считаем не целесообразным использование “GMTED2010” в пределах горных территорий, пластово-аккумулятивных равнин и низменностей юга ЕТР.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования было установлено, что наиболее схожие значения ЭПР, получаются при использовании варианта модели “GMTED2010” – MEAN и модели SRTM C-SIR. При этом необходимо отметить, что все варианты модели GMTED2010 в пределах умеренно расчлененных равнин имеют относительно небольшие ошибки (7–54%), сопоставимые с ошибками полевых исследований эрозионных потерь почвы. Полученные ошибки ГЦМР GMTED2010 в пределах горных территорий или пластово-аккумулятивных равнин и низменностей имеют значительно большие ошибки ЭПР (68–322%), что, на наш взгляд, не позволяет ее использовать для модельной оценки почвенной эрозии в пределах данных типов рельефа.

В пределах умеренно расчлененных равнин различия ЭПР полученных с использованием вариантов модели GMTED2010 сопоставимы с различиями, обусловленными

влиянием шага сетки. В пределах горных территорий и пластово-аккумулятивных равнин и низменностей отличия ЭПР намного сильнее при использовании моделей разного разрешения, чем при использовании различных вариантов модели GMT-ED2010.

Среди всех рассмотренных методик для всех тестовых участков наименьшие значения ЭПР свойственны методике предложенной Г.А. Ларионовым. Наибольшие значения ЭПР получаются либо с использованием методики USLE либо с использованием методики предложенной И.Д. Муром и Дж.Л. Найбером.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00025, <https://rscf.ru/project/22-17-00025/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашаткин И.А., Мальцев К.А., Гайнутдинова Г.Ф., Усманов Б.М., Гафуров А.М., Ганиева А.Ф., Мальцева Т.С., Гиззатуллина Э.Р. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части Европейской территории России. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. Науки, 2020. Т. 162. вып. 4. С. 612–628. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628>
2. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденеева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов европейской России // География и природные ресурсы. 2017. Вып. 2. С. 27–36.
3. Кондратьева М.А., Чащин А.Н. Оценка эрозийной опасности рельефа на основе цифрового моделирования // ИнтерКарто, ИнтерГИС. 2021. Т. 27, вып. 2. С. 241–252. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
4. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
5. Национальный атлас почв Российской Федерации. Под ред. С.А. Шобы. М. Астрель, 2011. 632 с.
6. Национальный атлас России. Том 2 (Природа.Экология). Под ред. Левитина И.Е. М.: Роскартография, 2007. 495 с.
7. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. 2011. Вып. 3. С. 40–46.
8. Почвенно-эрозийная карта СССР. Масштаб 1 : 5000000. Под ред. С.С. Соболева. М.: ГУГК, 1968.
9. Украинский П.А., Буряк Ж.А. К постановке опыта по поиску оптимальной формулы расчета эрозийного потенциала рельефа // Фундаментальные основы создания систем земледелия с целью сохранения и воспроизводства окружающей среды: Материалы Всероссийской школы молодых ученых. Белгород, 2018. С. 214–218.
10. Флоринский И.В. Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто, ИнтерГИС. 2021. Т. 27. вып. 2. С. 394–447. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>
11. Bayik Ç., Becek K., Mekik Ç., Özendi M. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model // Remote Sens. Lett. 2018. V. 9. № 6. P. 607–615. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1453174>
12. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Science of The Total Environment. 2021. № 780.146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
13. Carabajal C.C., Harding D.J., Boy Jean-Paul, Danielson J.J., Gesch D.B., Suchdeo V.P. Evaluation of the Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control", Proc. SPIE 8286, International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications, 82861Y (24 October 2011); <https://doi.org/10.1117/12.912776>
14. Dabney S.M., Yoder D.C., Vieira D.A.N. The application of the Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, to evaluate the impacts of alternative climate change scenarios on runoff and sediment yield // Journal of Soil and Water Conservation. 2012. № 67. P. 343–353. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.343>
15. Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010(GMTED2010) (No. Open-File Report 2011–1073). Reston: U.S. Geological Survey 2011. <https://doi.org/10.3133/ofr20111073>

16. *Desmet P.J.J., Govers G.A* GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. № 51. P. 427–433.
17. *Krasilnikov P., Makarov O., Alyabina I., Nachtergaele F.* Assessing soil degradation in northern Eurasia // *Geoderma Regional*. 2006. № 7. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.11.002>
18. *Lindsay J.B., Creed I.F.* Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data // *Computers & Geosciences*. 2006. № 32. P. 1192–1204.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.002>
19. *Maltsev K., Yermolaev O.* Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *CATENA*. 2020. № 195. 104726.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
20. *Moore I.D., Nieber J.L.* Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution // *J. Minn. Acad. Sci.* 1989. N 55. P. 18–25.
21. *Nachtergaele F.O., Petri M., Biancalani R., van Lynden G., van Velthuisen H., Bloise M.* Global Land Degradation Information System (GLADIS), an information database for land degradation assessment at global level. Version 1.0. Rome, 2011.
22. *Phinzi K., Ngetar N.S.* The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. № 7. P. 27–46.
23. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C.* Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
24. *Reuter H.I., Nelson A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A.* A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters // *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2009. № 5. P. 240–243.
<https://doi.org/10.1109/IgARSS.2009.5417688>
25. *Tan M.L., Ficklin D.L., Dixon B., Ibrahim A.L., Yusop Z., Chaplot V.* Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow // *Applied Geography*. 2015. № 63. P. 357–368.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.014>
26. *Thomas J., Prasannakumar V., Vineetha P.* Suitability of spaceborne digital elevation models of different scales in topographic analysis: an example from Kerala, India. // *Environmental Earth Sciences*. 2015. № 73. P. 1245–1263.
<https://doi.org/10.1007/s12665-014-3478-0>
27. *Van Oost K., Quine T.A., Govers G., De Gryze S., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J.V., Marques Da Silva J.R., Merckx, R.* The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle // *Science*. 2007. № 80. P. 626–629.
<https://doi.org/10.1126/science.1145724>
28. *Verstraeten G., Oost K., Rompaey A.* Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling // *Soil Use and Management*. 2006. № 18. P. 386–394.
<https://doi.org/10.1079/SUM2002150>
29. *Wischmeier W.H., Smith D.D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.

Quality Analysis of the Global Digital Relief Model GMTED2010 for Evaluation of the Erosion Potential (on the Example of the South of the European Territory of Russia)

K. Maltsev*

Kazan Federal University, Kazan, Russia

*E-mail: mlcvkirill@mail.ru

Abstract—The article presents a quantitative analysis of differences in the calculation of the LS-factor arising from the use of various options for the global digital elevation model GMTED2010: “Mean”; “Breakline emphasis”; “Median”. The global digital elevation model SRTM (C-SIR radar) was used as a reference for comparative analysis. In addition, an assessment of differences between values of LS-factor obtained by various methods was made. In this case, 4 methods for calculating the LS-factor were used, proposed in the: USLE method; RUSLE method; methodology proposed by the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of Moscow State University, methodology published by Moore I.D. and Nieber J.L. in 1989. The analysis was carried out within 4 test areas reflecting the

main types of relief in the south of the European territory of Russia. It has been established that the closest results in the calculation of the LS-factor to the SRTM C-SIR model are given by the variant of the model GMTED2010 "MEAN". The errors arising between the SRTM C-SIR and GMTED2010 "MEAN" models within moderately dissected plains are 7–54%, where most of the arable land is located. At the same time, errors within mountainous areas or stratal-accumulative plains and lowlands are 68–322%. An analysis of the use of various formulas for calculating the LS-factor shows that within all test areas the lowest values are obtained using the methodology proposed by the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of Moscow State University. and the highest values using USLE, or using the methodology proposed by Moore I.D. and Nieber J.L.

Keywords: LS-factor, GIS, DEM, GMTED2010, SRTM

REFERENCES

1. Ashatkin I.A., Maltsev K.A., Gainutdinova G.F., Usmanov B.M., Gafurov A.M., Ganieva A.F., Maltseva T.S., Gizzatullina E.R. Analysis of relief morphometry by global DEM in the southern part of the European territory of Russia // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estvennyye Nauki*. 2020. T. 162. Vyp. 4. S. 612–628.
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628>
2. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. Cartographic model of river basins of European Russia // *Geography and Natural Resources* April 2017. T. 38. Vyp. 2. P. 131–138.
[https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2017-2\(27-36\)](https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2017-2(27-36))
3. Kondrateva M.A., Chashchin A.N. Assessment of erosion risk of relief based on the digital modeling InterCarto. InterGIS // *GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography. 2021. T. 27. Vyp. 2. S. 241–252.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
4. Larionov G.A. Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnyye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki. Moscow: MGU Publ., 1993. 200 s.
5. *Natsional'nyy atlas pochv Rossiyskoy Federatsii*. Pod red. S.A. Shoby. M. Astrel', 2011. 632 s.
6. *Natsional'nyy atlas Rossii. Tom 2 (Priroda. Ekologiya)*. Pod red. Levitina I.Ye. M.: Roskartografiya, 2007. 495 s.
7. On'kov I.V. Otsenka tochnosti vysot SRTM dlya tseley ortotransformirovaniya kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya // *Geomatika*. 2011. Vyp. 3. S. 40–46.
8. *Pochvenno-erozionnaya karta SSSR. Masshtab 1 : 5000000*. Pod red. S.S. Soboleva. M.: GUGK, 1968.
9. Ukrainskiy P.A., Buryak ZH.A. K postanovke opyta po poisku optimal'noy formuly rascheta erozionnogo potentsiala rel'yefa // *Fundamental'nyye osnovy sozdaniya sistem zemledeliya s tsel'yu sokhraneniya i vosproizvodstva okruzhayushchey sredy: Materialy Vserossiyskoy shkoly molodykh uchenykh*. Belgorod, 2018. S. 214–218.
10. Florinskiy I.V. Geomorfometriya segodnya. InterKarto, InterGIS. 2021. T. 27. Vyp. 2. S. 394–447.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>
11. Bayik Ç., Becek K., Mekik Ç., Özendi M. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model // *Remote Sens. Lett.* 2018. V. 9. № 6. P. 607–615.
<https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1453174>
12. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // *Science of The Total Environment*. 2021. № 780.146494.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
13. Carabajal C.C., Harding D.J., Boy Jean-Paul, Danielson J.J., Gesch D.B., Suchdeo V.P. Evaluation of the Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control", *Proc. SPIE 8286, International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications, 82861Y (24 October 2011)*.
<https://doi.org/10.1117/12.912776>
14. Dabney S.M., Yoder D.C., Vieira D.A.N. The application of the Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, to evaluate the impacts of alternative climate change scenarios on runoff and sediment yield // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2012. № 67. P. 343–353.
<https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.343>
15. Danielson J.J., Gesch D.B. *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)* (No. Open-File Report 2011–1073). Reston: U.S. Geological Survey 2011.
<https://doi.org/10.3133/ofr20111073>

16. Desmet P.J.J., Govers G.A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. № 51. P. 427–433.
17. Krasilnikov P., Makarov O., Alyabina I., Nachtergaele F. Assessing soil degradation in northern Eurasia // *Geoderma Regional*. 2006. № 7. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.11.002>
18. Lindsay J.B., Creed I.F. Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data // *Computers & Geosciences*. 2006. № 32. P. 1192–1204.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.002>
19. Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *CATENA*. 2020. № 195. 104726.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
20. Moore I.D., Nieber J.L. Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution // *J. Minn. Acad. Sci.* 1989. № 55. P. 18–25.
21. Nachtergaele F.O., Petri M., Biancalani R., van Lynden G., van Velthuisen H., Bloise M. Global Land Degradation Information System (GLADIS), an information database for land degradation assessment at global level. Version 1.0. Rome, 2011.
22. Phinzi K. Ngetar N.S. The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. № 7. P. 27–46.
23. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
24. Reuter H.I., Nelson A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A. A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters // *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2009. № 5. P. 240–243.
<https://doi.org/10.1109/IgARSS.2009.5417688>
25. Tan M.L., Ficklin D.L., Dixon B., Ibrahim A.L., Yusop Z., Chaplot V. Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow // *Applied Geography*. 2015. № 63. P. 357–368.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.014>
26. Thomas J., Prasannakumar V., Vineetha P. Suitability of spaceborne digital elevation models of different scales in topographic analysis: an example from Kerala, India. // *Environmental Earth Sciences*. 2015. № 73. P. 1245–1263.
<https://doi.org/10.1007/s12665-014-3478-0>
27. Van Oost K., Quine T.A., Govers G., De Gryze S., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J.V., Marques Da Silva J.R., Merckx, R.. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle // *Science*. 2007. № 80. P. 626–629.
<https://doi.org/10.1126/science.1145724>
28. Verstraeten G., Oost K., Rompaey A. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling // *Soil Use and Management*. 2006. № 18. P. 386–394.
<https://doi.org/10.1079/SUM2002150>
29. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.