

Картографическое и геоинформационное обеспечение исследований водных объектов и прибрежных территорий

Cartographic and GIS support for studies of water bodies and coastal territories

УДК: 551.4.042+528.7

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-196-211

А. В. Погорелов¹, А. А. Лагута², Е. Н. Киселев³

РЕКИ ВОСТОЧНОГО ПРИАЗОВЬЯ КАК ПРОДУКТ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО ТЕХНОГЕНЕЗА

АННОТАЦИЯ

Средообразующее значение средних и малых рек недооценивается исследователями, хотя именно эти экосистемы имеют высокую уязвимость и подвержены необратимой техногенной трансформации. Один из ключевых факторов трансформации средних и малых степных рек на Юге России — зарегулированность стока, вызванная массовым сооружением плотин и дамб. До сих пор геоморфологическому техногенезу степных рек уделялось недостаточное внимание. Цель исследования — оценить геоморфологические последствия сооружения водоподпорных гидротехнических сооружений на характерных реках Восточного Приазовья (Кирпили и Понура). Исходные данные — материалы воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки, проведенных в июле–августе 2019 г. (период межени) вдоль русел рек, а также полевые исследования. Площадь съемки — 1 333 км², плотность точек лазерных отражений — 15–20 точек/м². Векторизация водоемов и анализ морфологии речных русел выполнены по построенной ЦМР с пространственным разрешением 1 м. Рельеф речных долин анализировался инструментами геоморфометрии с помощью индекса MaxDifferenceFromMean. По данным ЦМР в среде ГИС рассчитаны характеристики гидротехнических сооружений и прудов. Построенные продольные профили имеют форму ступеней (ступеней) между водоподпорными сооружениями. Так, в русле Кирпили на участке протяженностью 217 км расположено 82 перегораживающих сооружения; сухие участки русел (всего 11) занимают 2,9 км. Суммарная площадь прудов, образованных подпором от перегораживающих сооружений в русле Кирпили, составляет 3 862 га при средней площади пруда 55 га. Расчленение русла на фрагменты, разделенные плотинами, приводит к радикальной перестройке геоморфологических процессов в речной системе со снижением морфодинамической активности руслового потока, включая глубинную и боковую эрозию. Следствие геоморфологического техногенеза: реки, преобразованные в цепь водоемов, утратили свои экосистемные функции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточное Приазовье, речные системы, перегораживающие водо-подпорные сооружения, воздушное лазерное сканирование, цифровая модель рельефа, геоморфологический техногенез

¹ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040,
e-mail: pogorelov_av@bk.ru

² Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040,
e-mail: alaguta@icloud.com

³ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040,
e-mail: enkiselev@gmail.com

Anatoly V. Pogorelov¹, Andrey A. Laguta², Evgeny N. Kiselev³

RIVERS OF THE EASTERN AZOV REGION AS A PRODUCT OF GEOMORPHOLOGICAL TECHNOGENESIS

ABSTRACT

The environment-forming importance of medium and small rivers is underestimated by researchers, although these particular ecosystems are highly vulnerable and subject to irreversible technogenic transformation. One of the key factors in the transformation of medium and small steppe rivers in the South of Russia is the regulation of runoff caused by the mass construction of dams. Until now, insufficient attention has been paid to the geomorphological technogenesis of steppe rivers. The aim of the study is to assess the geomorphological consequences of the construction of water-retaining hydraulic structures on typical rivers of the Eastern Azov Region (Kirpili and Ponura). The initial data are materials of airborne laser scanning and digital aerial photography conducted in July–August 2019 (low-water period) along the river beds, as well as field studies. The survey area is 1 333 km², the density of laser reflection points is 15–20 points/m². Vectorization of water bodies and analysis of river channel morphology were performed using the constructed DEM with a spatial resolution of 1 m. The relief of river valleys was analyzed using geomorphometry tools using the MaxDifferenceFromMean index. Based on the DEM data, the characteristics of hydraulic structures and ponds were calculated in the GIS environment. The constructed longitudinal profiles have the form of steps (ledges) between water-retaining structures. Thus, in the Kirpili channel, on a section with a length of 217 km, there are 82 blocking structures; dry sections of channels (11 in total) occupy 2.9 km. The total area of ponds formed by the backwater from the damming structures in the Kirpili riverbed is 3 862 hectares with an average pond area of 55 ha. The dismemberment of the riverbed into fragments separated by dams leads to a radical restructuring of geomorphological processes in the river system with a decrease in the morphodynamic activity of the riverbed flow, including deep and lateral erosion. As a consequence of geomorphological technogenesis, the rivers, transformed into a chain of reservoirs, have lost their ecosystem functions.

KEYWORDS: Eastern Azov Region, river systems, damming water-retaining structures, airborne laser scanning, digital elevation model, geomorphological technogenesis

ВВЕДЕНИЕ

Средние и малые реки в степной зоне Юга России вовлечены в целый ряд экологических и геоморфологических процессов, приводящих к изменению их функционально-структурной организации в целом и к перестройке речных русел в частности. Техногенная активность в речных бассейнах приобретает различные формы, проявляющиеся в разнообразных и разномасштабных воздействиях на речные системы. Среди основных экологических угроз для пресноводных экосистем выделяют, как правило, нарушение водного режима, чрезмерную эксплуатацию, эвтрофирование, загрязнение вод, засорение, инвазии чужеродных видов [Суздалева, Горюнова, 2015; Dudgeon et al., 2006]. Ключевыми факторами трансформации пресноводных экосистем выступают строительство гидротехнических сооружений, сельское хозяйство, вселение чужеродных видов, изменение режима рек и снижение уровня весенних половодий, спрямление русел, обвалование пойм [Башинский и др., 2024]. Применительно к степным рекам на территории Краснодарского края, согласно

¹ Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: pogorelov_av@bk.ru

² Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: alaguta@icloud.com

³ Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: enkiselev@gmail.com

[Федорова и др., 2010; Погорелов и др., 2021; 2022; 2024], к факторам геоморфологической трансформации следует добавить фрагментацию речных русел вследствие строительства перегораживающих сооружений, изменения жидкого и твердого стока, хозяйственное освоение пойменных и прилегающих к поймам территорий. Прямое техногенное или опосредованное техногенной деятельностью изменение рельефа речных долин (прежде всего — русел) вслед за [Суздалева, Горюнова, 2014] назовем геоморфологическим техногенезом.

Реки Восточного Приазовья относятся к классу средних и малых рек, гидрологическая и экологическая значимость которых зачастую недооценивается исследователями. Так, высокая интенсивность многих процессов в небольших водных экосистемах позволяет им играть неожиданно огромную роль в глобальных биогеохимических циклах [Downing, 2010]. Именно малые реки вследствие высокой уязвимости подвергаются необратимой трансформации, вплоть до исчезновения [Векшина и др., 2022].

Трансформация рек Восточного Приазовья имеет вековую историю — с начала освоения степных земель, и интенсивность трансформации (деградации) сопряжена с характером хозяйственной деятельности. Начальный период трансформации (XIX в. – первая половина XX в.) характеризовался экстенсивной распашкой водосборов и урбанизацией — ростом площади населенных пунктов и их инфраструктуры. Для последующего периода (вторая половина XX в.) характерны массовые сооружения постоянных водоподпорных гидротехнических сооружений — ГТС (плотины, дамбы) и увеличение зарегулированности речного стока.

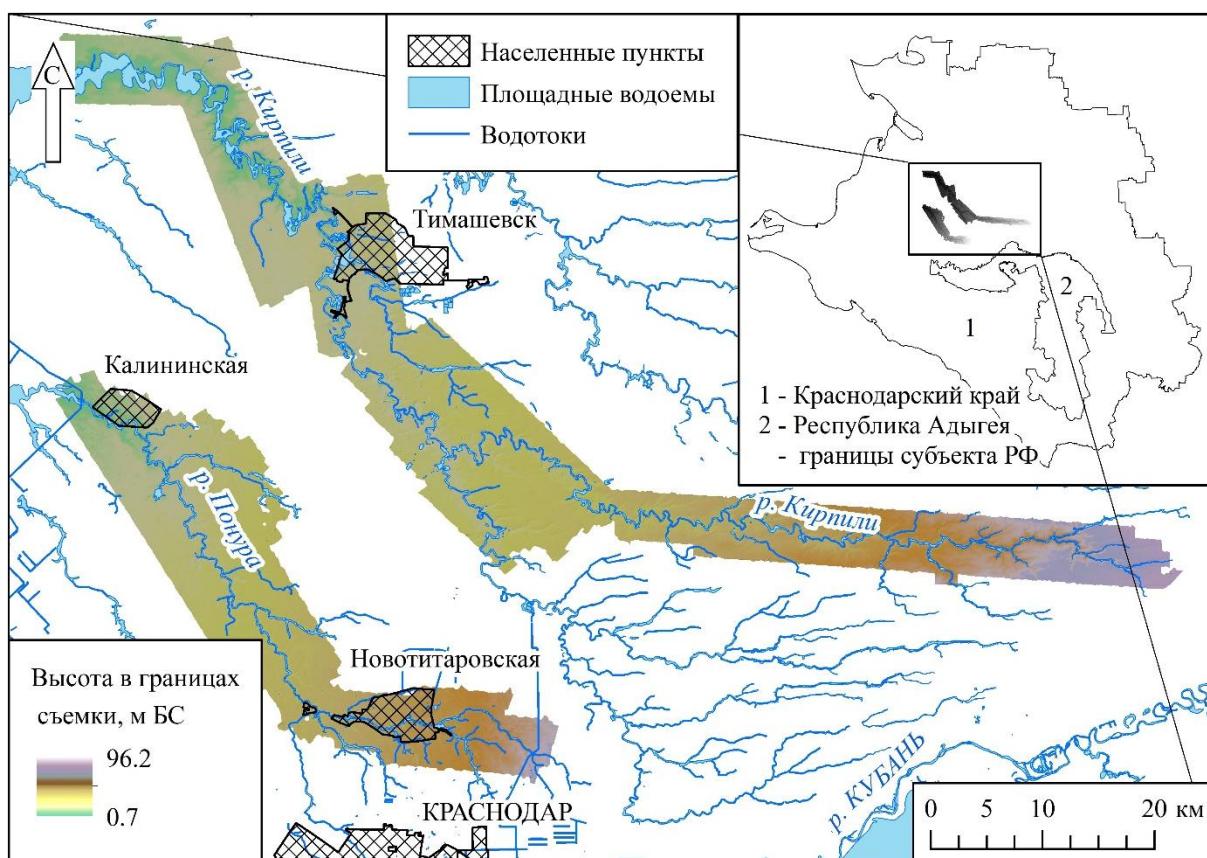
Во второй половине XX в. запущен механизм техногенной деградации речной сети, т. е. снижения ее водохозяйственного потенциала и качества рек, представляющих ценность для человека. Процесс деградации сопровождался заилиением речных русел, усиленным поступлением загрязняющих веществ, сокращением речной сети и отмиранием водотоков в верховьях рек, утратой рек способности к самоочищению [Никаноров и др., 2006; Суслов, 2015; Косолапов и др., 2017; Дрововозова, Паненко, 2019; Погорелов и др., 2021; 2022; 2024].

Нынешний период (первая четверть XXI в.) отражает, по нашему мнению, повсеместное преобразование речных систем Восточного Приазовья в ходе их расчленения, фрагментации с переходом к новой (вторичной) структурно-функциональной организации. При расчленении реки естественное равновесие в вещественном балансе в системе «водосбор – пойма – русло» и «эрозия – транспорт – аккумуляция» оказывается нарушенным и вызывает цепь прямых и косвенных последствий, включая радикальную перестройку геоморфологических процессов. В отношении последних уместно, на наш взгляд, понятие спонтанного геоморфологического техногенеза.

В настоящей статье рассмотрены последствия радикальных техногенных воздействий на рельеф речных русел степной зоны Юга России, при которых реки как экосистемы утрачивают свою целостность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реки Кирпили и Понура (рис. 1) с позиции географической обстановки представляют собой типичные речные системы степной зоны Краснодарского края в пределах слабо расчлененной Кубано-Приазовской низменности. Относятся к средним (Кирпили) и малым (Понура) рекам (табл. 1). Неглубокие речные долины Кирпили и Понуры не нарушают плоской формы низменности, представленной на поверхности толщами лессовидных суглинков и супесей. В отличие от более крупных рек Восточного Приазовья (Ея, Бейсуг), впадающих в лиманы Азовского моря, долины Кирпили и Понуры в низовьях перегорожены прирусловыми валами рукавов палеодельты Кубани и не доносят воду до Азовского моря, растекаясь в плавнях.



*Рис. 1. Расположение рек Кирпили и Понуры на территории Краснодарского края.
Заливкой показаны участки аэросъемки*

*Fig. 1. Location of the Kirpili and Ponura rivers in the Krasnodar Region.
The areas of aerial survey are shown in shaded areas*

*Табл. 1. Сведения о реках и участках аэросъемки
Table 1. Information about rivers and aerial survey areas*

Река	Длина, км	Площадь бассейна, км ²	Площадь участка съемки, км ²	Даты съемки
Кирпили	202	2 650	867,9	22–23.07.2019, 11.08.2019
Понура	97	1 460	465,0	21.07.2019, 11.08.2019

Действующие площади бассейнов, на которых происходит формирование стока Кирпили и Понуры, равны соответственно 577 и 179 км² [Суслов, 2015], что в 5–8 раз меньше площади бассейнов [Ресурсы..., 1973; Лурье, Панов, 2021]. Коэффициент стока с действующей площади, отражающий долю стока от атмосферных осадков, составляет 0,48 (Кирпили) и 0,31 (Понура), что показывает подчиненное участие осадков в формировании речного стока, особенно в меженный период. Основным источником питания в межень являются подземные воды. Неглубоким (0,2–1,5 м) рекам свойственны извилистые русла (рис. 1), заросшие влаголюбивой растительностью и отсутствие поймы в верхнем и на значительной протяженности среднего течения. Течение наблюдается в период весеннего половодья, а в остальное время практически отсутствует, чему способствуют многочисленные плотины без регулирующих водопропускных сооружений.

В качестве исходных данных использованы материалы воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки, проведенных в 2019 г. на общей площади 1 333 км². Границы аэрофотосъемки речных долин Понуры и Кирпили в пределах Краснодарского края приведены на рис. 1; сведения о площади и датах проведения работ указаны в табл. 1. Средняя плотность точек лазерных отражений составила 15–20 точек/м². Параметры съемки: система координат — UTM 37N, система высот — Балтийская 1977 г.

Для построения высокоточной цифровой модели рельефа (ЦМР) с последующим анализом морфологии русел выполнена обработка данных лидарной съемки и классификация исходного массива точек лазерных отражений (ТЛО). Предварительно проведена регуляризация массива ТЛО на блоки 250×250 м. Стандартными инструментами программы Terrasolid выделены классы физической поверхности: земля, вода, растительность, дорожное покрытие, железная дорога, гидротехнические сооружения. На следующем этапе выполнена оценка качества классификации путем построения ЦМР со светотеневой отмывкой по каждому из блоков регулярной сетки. Светотеневая отмывка — надежный способ выявления и устранения ошибок автоматизированной классификации. Ошибки в большинстве случаев связаны с особенностями вертикального разброса ТЛО при отражении от поверхности растительности, покрывающей значительную часть речных русел.

Построение продольных и поперечных профилей — классический и весьма информативный прием в гидрологии, применяемый для анализа гидрологических, гидравлических и геоморфологических характеристик рек [Schumm, 1977; Knighton, 1998; Федорова и др., 2010; Макаревич, 2019]. Продольный профиль как мегаформа морфологических проявлений, связанных с общими направленными вертикальными деформациями [Чалов, Камышев, 2021], отражает изменения потерь энергии потока и соотношений между стоком наносов и транспортирующей способностью потока по длине реки [Маккавеев, 1955; Маккавеев, 1971; Кондратьев и др., 1982].

Съемка осуществлялась в меженный период; некоторые участки русел были сухими. По этой причине в нашем случае построенные профили представлены отметками дна и водной поверхности вдоль (продольный профиль) и поперек (поперечный) исследуемых речных русел. Восстановление естественного, не нарушенного процессами техногенеза продольного профиля осуществлялось посредством его проведения через точки подножия уступов.

Основой для построения и аппроксимации линий продольных профилей послужила ЦМР с заданным пространственным разрешением 1 м, полученная по всем выделенным классам поверхности, исключая растительность. Выбор положения оси продольного профиля исследуемых рек определялся местными особенностями меандрирования и затопления русел (фактически представленных цепочками прудов), а также наличием или отсутствием поймы. В затопленном русле линия профиля проводилась по продольной оси пруда; если же русло в излучинах визуально не дешифрировалось при наличии подпора от ГТС, то профиль смещался к вогнутому берегу, образованному боковой эрозией (рис. 2). Материалы аэрофотосъемки (ортографопланы) использованы для уточнения положения продольных профилей и векторизации контуров прудов.

Морфологические элементы исследуемых речных долин (руслы, поймы, склоны, уступы, бровки и подножия уступов и т. д.) распознавались с применением индекса MaxDifferenceFromMean в программном продукте WhiteboxTools [Lindsay et al., 2015]. Наш опыт [Лагута, Погорелов, 2024; Pogorelov et al., 2021; Pogorelov et al., 2023] свидетельствует о применимости подобных индексов для морфометрического анализа рельефа речных долин. MaxDifferenceFromMean — разномасштабный индекс, предусматривающий возможность распознавания элементов морфологии на топографической поверхности путем указания минимального и максимального радиуса поиска ближайших соседей для

ячейки, а также шага обработки. Так, если минимальное введенное значение — 3, а максимальное — 100 ячеек, то в процессе расчета индекса при шаге обработке 1 будет создано 98 усредненных моделей и рассчитано 98 разностей с последующим выбором максимальной из них.

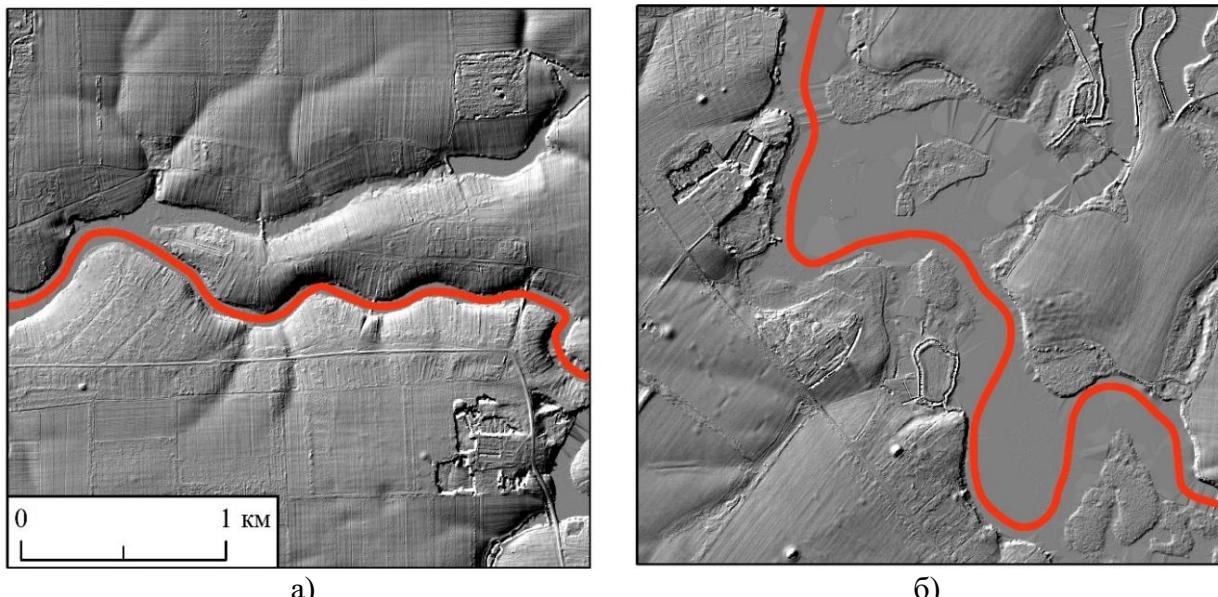


Рис. 2. Примеры выбора положения линии продольного профиля (красная линия) в затопленном русле (а) и при наличии затопленной поймы (б)

Fig. 2. Examples of choosing the position of the longitudinal profile line (red line) in a flooded channel (a) and in the presence of a flooded floodplain (b)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поперечные профили

В долине р. Кирпили отчетливо выделяется верхнее, среднее и нижнее течения. Для верховий характерен наиболее глубокий врез русла и отсутствие пойменной террасы (рис. 3в). Под пойменной террасой (поймой) здесь понимается часть дна долины, затопляемая в половодье и поднятая над меженным уровнем [Маккавеев, 1955]. Представляет собой площадку в виде более или менее плоской поверхности, возникшую при воздействии водотоков на берега и соответствующую поверхности наносов (при аккумуляции) или поверхности размыва (при эрозии) [Гудымович, 2005]. В среднем течении ниже станицы Раздольной наблюдается расширение долины с появлением пойменной террасы и следов меандрирующего русла (рис. 3б). В нижнем течении отчетливо выражена пойма шириной до 2,5 км, как правило, затопленная (рис. 3а).

В долине р. Понуры в ее верхнем и среднем течении высота склонов долины имеет близкие отметки (менее 5 м) (рис. 4б), значительно уступая высоте склонов в долине р. Кирпили (рис. 3). Пойма, затопленная в период съемки, обнаруживается только в нижнем течении (рис. 4а).

Продольные профили

Продольный профиль р. Понуры (рис. 5) построен на участке течения р. 2-я Понура ниже пересечения с автодорогой А-136 до впадения в основную реку и вниз до Понурского лимана. Последний представляет собой водоем, заросший густой водно-болотной растительностью, т. е. плавни. Длина профиля равна 78,8 км, падение — 53 м. Сухие участки русел в количестве 7 общей протяженностью около 10,0 км приурочены к участкам выше и ниже станицы Новотитаровской (рис. 5).

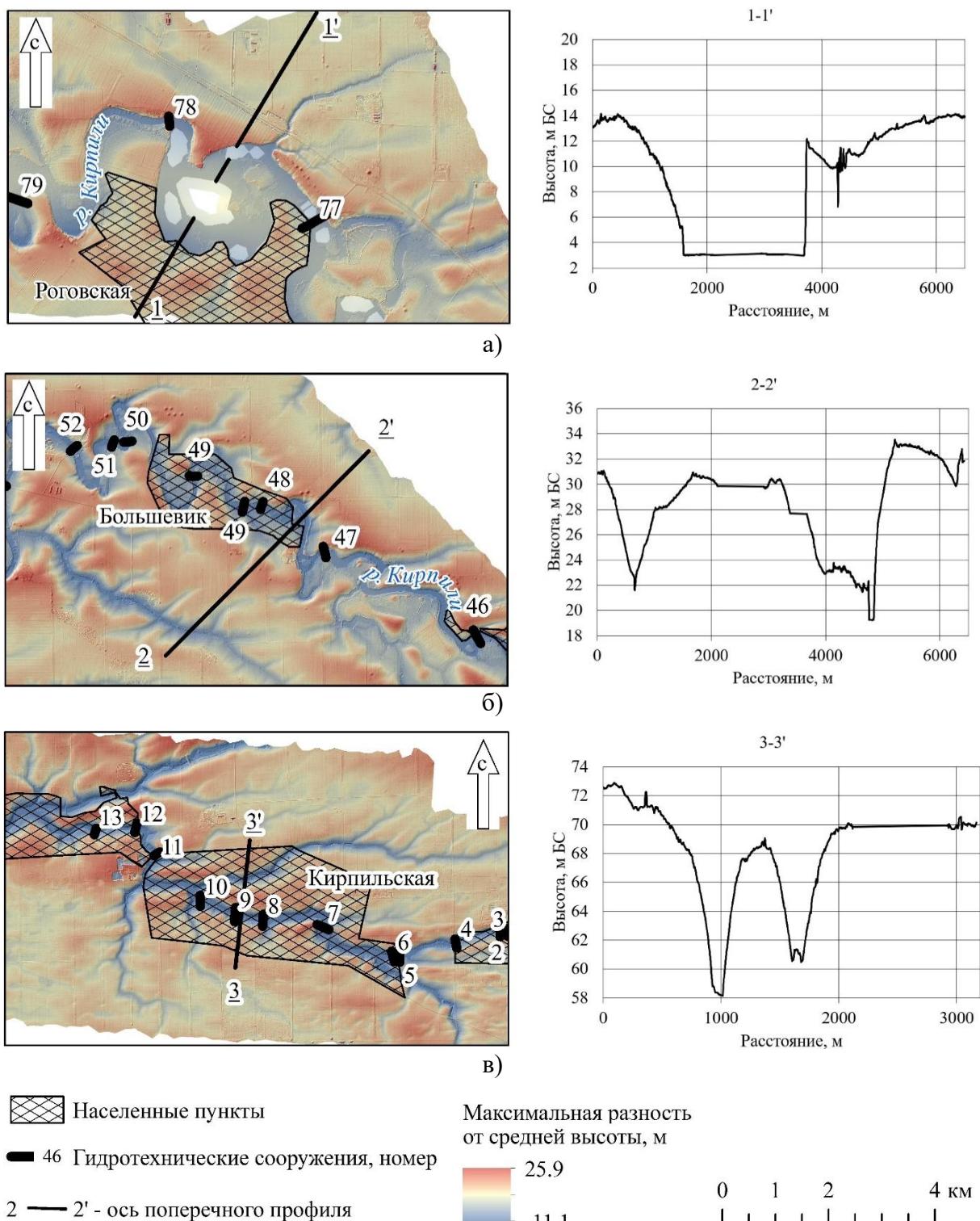


Рис. 3. Распределение величины индекса MaxDifferenceFromMean вдоль русла р. Кирпили. Характерные поперечные профили верхнего (в), среднего (б) и нижнего (а) течения р. Кирпили

Fig. 3. Distribution of the MaxDifferenceFromMean index value along the Kirpili River bed. Characteristic transverse profiles of the upper (c), middle (b) and lower (a) reaches of the Kirpili River

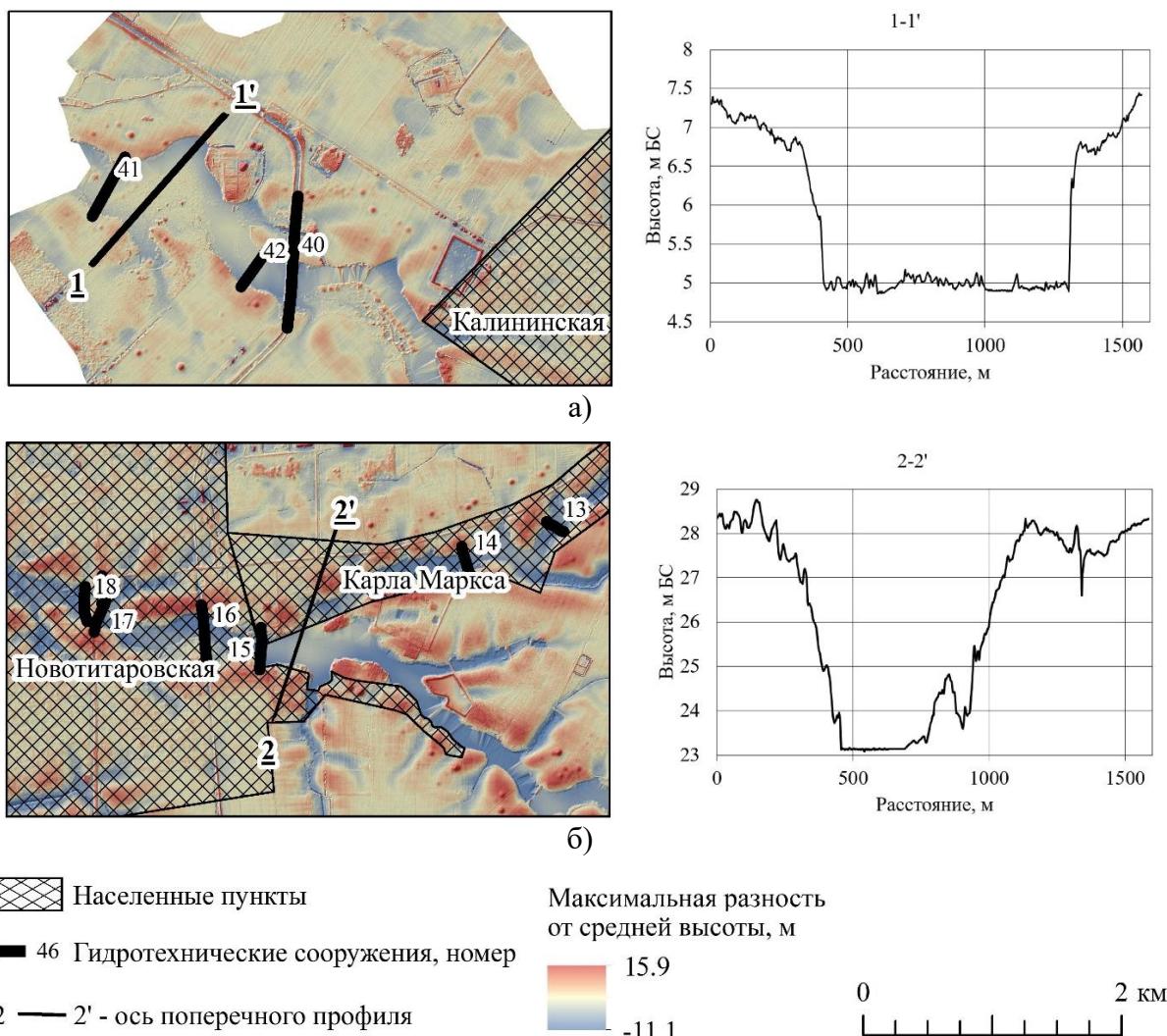


Рис. 4. Распределение величины индекса MaxDifferenceFromMean вдоль русла р. Понуры.

Характерные поперечные профили среднего (б) и нижнего (а) течения р. Понуры
Fig. 4. Distribution of the MaxDifferenceFromMean index value along the Ponura River bed.
Characteristic transverse profiles of the middle (b) and lower (a) reaches of the Ponura River

Как видим, русло р. Понуры занимает цепочка прудов, выраженная в продольном профиле уступами, заключенными между перегораживающими водоподпорными сооружениями (рис. 5). По данным продольного профиля рассчитаны отметки уреза воды у ГТС, величины подпора и площади прудов, которые внесены в созданную базу данных. Фрагмент базы данных представлен в табл. 2. В русле насчитывается 34 перегораживающих сооружения (рис. 5, табл. 2). Среднее расстояние между ГТС здесь равно 2,3 км. Общая площадь водоемов, созданных подпором от ГТС, перегораживающих русло р. Понуры, на период съемки составляет 960,5 га при средней площади пруда 28,3 га в интервале от 0,8 до 99,8 га (табл. 3). Средняя величина подпора равна 0,7 м, максимальная — 3,2 м. Имеется 10 участков с величиной подпора менее 0,02 м, занимающих суммарную площадь 256 га или 27 % от площади всех прудов.

Продольный профиль р. Кирпили (рис. 6) построен для русла на всем его протяжении — от пос. Южный Усть-Лабинского района (исток реки) до с. Пригородное Приморско-Ахтарского района, где речная система теряет свои признаки, переходя в болото (плавни). Длина профиля — 216,7 км, падение — 71 м. Поскольку профиль построен по

ЦМР высокого пространственного разрешения, длина его превышает указанную (табл. 1) длину реки. Сухие на момент съемки участки русел в количестве 11 штук и протяженностью 2,9 км приурочены к верховьям реки на участке профиля выше станицы Кирпильской. Остальную часть русла на участках между ГТС занимает цепочка прудов, представленная на продольном профиле уступами (рис. 6). Количество прудов, судя по профилю, равное количеству уступов, составляет 71 (табл. 2). Общее число перегораживающих водоподпорных сооружений на исследуемом участке русла равно 82 при среднем расстоянии между перегораживающими сооружениями 2,6 км.

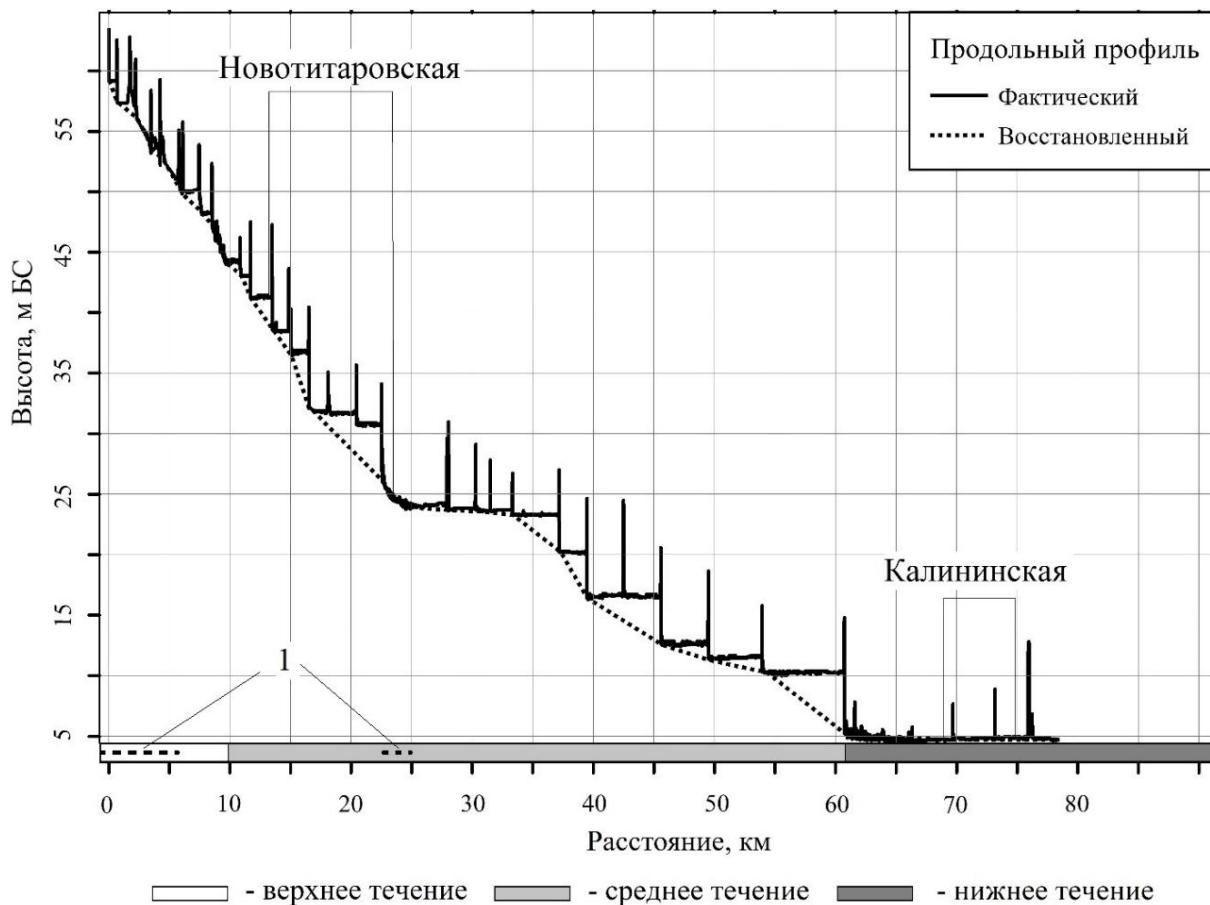


Рис. 5. Фактический и восстановленный продольный профиль р. Понуры.

I — сухие участки русла

Fig. 5. Actual and reconstructed longitudinal profile of the Ponura River.

I — dry sections of the riverbed

Площади прудов на исследуемом участке р. Кирпили изменяются в пределах 0,15–49,2 га. Общая площадь водоемов, созданных подпором от перегораживающих русло р. Кирпили ГТС, составляет 3 861,6 га при средней площади пруда 55,1 га (табл. 3). Средняя величина подпора составляет 0,9 м, максимальная — 3,9 м, при этом зафиксировано 13 участков, где подпор равен 0 м с суммарной площадью прудов 1 351,6 га (35 % от общей площади прудов). Восстановленный продольный профиль р. Кирпили имеет характерную вогнутую форму (рис. 6) и относится к типу выработанных, близких к равновесному. Это указывает на сбалансированность эрозии и аккумуляции в период, предшествовавший массовому строительству плотин в русле Кирпили.

*Табл. 2. Характеристики перегораживающих гидротехнических сооружений
и образованных ими прудов в русле р. Понуры*
*Table 2. Characteristics of the damming hydraulic structures
and the ponds they formed in the Ponura River bed*

Номер ГТС и пруда	Отметка уреза воды на дату съемки, м	Дата съемки	Величина подпора, м	Площадь образуемого ГТС пруда, га
1П	32,05	11.08.2019	0,61	3,38
2П	31,15		0,90	0,92
11П	27,52		1,00	13,21
12П	26,60		0,92	8,41
13П	24,71		1,89	17,61
14П	24,00		0,71	13,06
15П	23,11		0,89	64,95
16П	21,82		1,29	6,86
18П	21,80		0,02	2,45
17П	21,80		0	15,21
19П	20,82		0,98	22,48
20П	18,42		2,40	8,35
21П	18,41		0,01	12,89
22П	18,28		0,13	25,62
23П	17,85		0,43	26,48
24П	14,63		3,22	37,15
25П	14,62		0,01	0,81
26П	14,62	21.07.2019	0	23,18
27П	14,31		0,31	15,51
28П	14,31		0	23,69
29П	14,14		0,17	44,41
30П	12,65		1,49	30,33
31П	11,53		1,12	29,65
32П	10,77		0,76	37,94
33П	8,75		2,02	33,13
34П	8,13		0,62	45,44
35П	7,96		0,17	99,76
36П	4,91		3,05	53,74
37П	4,86		0,05	17,89
38П	4,81		0,05	48,23
39П	4,81		0	77,31
40П	4,81		0	40,59
42П	4,81		0	6,19
41П	4,80		0,01	53,71

Геометрия ступенчатых профилей (рис. 5–6) — результат техногенных деформаций русел — свидетельствует об отсутствии значимого уклона водной поверхности у прудов, заключенных между ГТС. Иначе говоря, течение, как проявление речных свойств и одновременно водно-эрэозионных процессов, не выражено на всем протяжении русла с искусственным ступенчатым профилем.

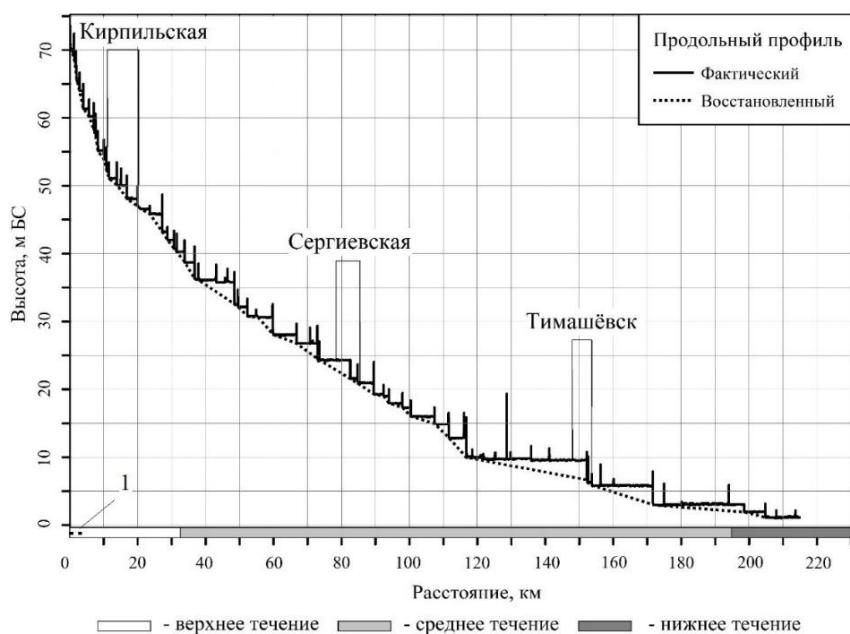
Известно, что перегораживающие водоподпорные сооружения оказывают определяющее влияние на жидкий сток и сток наносов, русловые процессы и другие свойства рек, коренным образом изменяя морфологическое строение русел и пойм, особенно на

равнинных реках [Макаревич, Яротов, 2019]. Преобладающая часть плотин в руслах степных рек Краснодарского края не имеет функциональных водопропускных устройств. Строительство плотины без водопропускного сооружения вызывает искусственное повышение местного базиса эрозии руслового потока. Расчленение единого русла на фрагменты, разделенные плотинами, приводит к формированию локальных профилей, отражающих принципиально иные русловые процессы, свойственные техногенным водным системам — малым водохранилищам.

Табл. 3. Обобщенные характеристики перегораживающих гидротехнических сооружений и образованных ими прудов в руслах рр. Кирпили и Понуры

Table 3. Generalized characteristics of the damming hydraulic structures and the ponds they formed in the beds of the Kirpili and Ponura rivers

Общее количество ГТС, образующих пруды	Характеристика	Величина подпора, м	Площадь пруда, га
р. Понура			
34	Минимальная	0	0,8
	Максимальная	3,22	99,8
	Средняя	0,74	28,3
	Сумма	—	960,5
р. Кирпили			
71	Минимальная	0	0,15
	Максимальная	3,89	492,3
	Средняя	0,92	55,1
	Сумма	—	3 861,6



*Рис. 6. Фактический и восстановленный продольный профиль р. Кирпили.
1 — сухие участки русла*

*Fig. 6. Actual and reconstructed longitudinal profile of the Kirpili River.
1 — dry sections of the riverbed*

При повышении базиса эрозии, недостатке предельного уклона водной поверхности на участке русла протяженностью 2–3 км, понижении эрозионной способности потока и ухудшении условий транспорта происходит критическое замедление движения донных наносов. При этом, судя по продольным профилям, донные наносы способны постепенно сползать в сторону плотины, повсеместно образуя своеобразные уступы. В процессе деградации и снижения транспортной деятельности процессы эрозии и транзита затухают, процесс аккумуляции (заливания) в руслах становится преобладающим.

Появление в речной системе техногенных барьеров в виде ГТС неизбежно приводит к следующим явлениям:

- появлению новых структур низшего порядка внутри речной системы;
- перестройке системы — переходу к вторичной структуре;
- перестройке геоморфологических процессов — от процессов в макросистеме (речная система) к доминирующему процессам в мезосистемах (пруды) с принципиально разными действующими вещественно-энергетическим механизмами.

Наряду с перестройкой геоморфологических процессов, вызванных глубинной эрозией, отметим перестройку процессов плановой деформации русел — меандрирования. Исследуемым рекам в условиях естественной эволюции свойственно свободное и ограниченное меандрирование (рис. 1), вообще присущее рекам степной зоны Краснодарского края при отсутствии факторов, препятствующих перемещению русла в плане. В настоящий период меандрированию препятствуют радикально изменившиеся условия русловых процессов и его факторов (режим и объемы стока воды и наносов), ограничивающие размыв берегов и транспорт наносов вдоль русла.

Текущую стадию техногенной деградации анализируемых речных систем с гидрологических и геоморфологических позиций следует охарактеризовать как близкую к коллапсу. По мнению [Newton, 2021], коллапс — это резкое изменение экосистемы, сопровождающееся потерей экосистемных функций с невозможностью самостоятельного восстановления в течение как минимум десяти лет. Согласно [Keith et al., 2015], коллапсом считается потеря экосистемой своих ключевых абиотических и биотических особенностей, неспособность поддерживать характерную биоту и трансформация в принципиально другой тип экосистемы.

ВЫВОДЫ

На исследованных участках рек Понуры (79 км) и Кирпили (217 км) насчитывается соответственно 41 и 82 водоподпорных перегораживающих сооружения со средними величинами подпора 0,7 м (Понура) и 0,9 м (Кирпили).

В результате неконтролируемой техногенной деятельности — спонтанного геоморфологического техногенеза — продольные профили рек Кирпили и Понуры приобрели ступенчато-прерванную форму, отражая чередование фрагментов русел, изолированных плотинами. Высокая плотность ГТС на исследуемых реках (в среднем через 2,3–2,6 км) привела к критическому снижению энергии руслового потока и морфодинамической активности русловых процессов, включая глубинную и боковую эрозию и, как следствие, к исчезновению в гидрологическом понимании самих русел на значительном протяжении рек. Таким образом, речные системы трансформированы в совокупность малых водоемов (прудов), утратив свои экосистемные функции. Фактически такая трансформация означает переход к вторичной структурно-функциональной организации.

Предпосылками разрушения исследуемых речных систем послужили: критическое уменьшение скорости водно-эрзационных процессов и объемов транспортной деятельности в масштабе речной системы, изменение интенсивности потоков вещества и энергии (на

макроуровне — появление недостатка вещества и энергии в речной системе) и, в конечном счете, изменение вещественных взаимосвязей. Главный результат подобной техногенной трансформации рек — прекращение их функционирования как целостных речных систем, что соответствует представлениям об исчезновении или коллапсе систем при отсутствии в настоящее время ресурсов для их дефрагментации и восстановления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-27-20005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башинский И. В., Кадетов Н. Г., Сенкевич В. А., Стойко Т. Г., Кацман Е. А. Осипов В. В. Трансформации экосистем пойменных водоемов в условиях современных природных и антропогенных изменений и возможные природоохранные стратегии. Успехи современной биологии, 2024. Т. 144. № 1. С. 80–96. DOI: 10.31857/S0042132424010063.*
- Векшина Т. В., Большаков В. А., Коринец Е. М. Экологические проблемы русел судоходных рек: Учебное пособие. СПб.: Медиапапир, 2022. 132 с.*
- Гудымович С. С. Речные террасы (некоторые замечания к морфологии, генезису и классификации). Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2005. Т. 308. № 5. С. 57–61.*
- Дрововозова Т. И., Паненко Н. Н. Экологическое состояние малых рек Ростовской области. Экология и водное хозяйство, 2019. № 1(01). С. 1–17.*
- Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снищенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.*
- Косолапов А. Е., Дандаря Н. Т., Капустин М. В. О разработке методологии подготовки комплексных планов восстановления и устойчивого функционирования бассейнов малых и средних рек. Общество. Развитие, 2017. № 3. С. 96–90.*
- Лагута А. А., Погорелов А. В. О реконструкции форм рельефа древней обвалованной поймы по данным воздушного лазерного сканирования (г. Краснодар). Устойчивость природных ландшафтов и их компонентов к внешнему воздействию. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Гроздный, 2024. С. 338–342.*
- Лурье П. М., Панов В. Д. Реки бассейна Азовского моря: Гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2021. 672 с.*
- Макаревич А. А. Яротов А. Е. Речной сток и русловые процессы. Минск: БГУ, 2019. 115 с.*
- Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Издательство АН СССР, 1955. 347 с.*
- Маккавеев Н. И. Сток и русловые процессы. М.: Издательство Московского университета, 1971. 116 с.*
- Никаноров А. М. Брызгало В. А., Решетняк О. С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. Ростов-на-Дону: НОК, 2006. 308 с.*
- Погорелов А. В., Липилин Д. А., Дудкина А. А., Копанева О. В. О техногенных преобразованиях речной сети на Азово-Кубанской равнине (реки Челбас, Албаш). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Международной конференции, 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 567–582. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582.*
- Погорелов А. В., Липилин Д. А., Киселев Е. Н. Об изменении гидрографических характеристик рек в степных агроландшафтах за последние десятилетия (на примере бассейна*

- р. Бейсуг, Краснодарский край). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Международной конференции, 2021. Т. 27. Ч. 4. С. 19–32. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32.
- Погорелов А. В., Липилин Д. А., Кузякина М. В.* О техногенной деградации речных систем в Восточном Приазовье: гидрографический аспект. Геология и геофизика Юга России, 2024. Т. 14. № 3. С. 243–259. DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 447 с.
- Суздалева А. Л., Горюнова С. В.* Техногенез и деградация поверхностных водных объектов. М.: Энергия, 2014. 456 с.
- Суздалева А. Л., Горюнова С. В.* Общая схема развития процесса антропогенной деградации водных объектов. Национальная ассоциация ученых (НАУ). Технические науки, 2015. № IV (9) С. 92–95.
- Суслов О. Н.* Степные реки Краснодарского края. Краснодар: КубГАУ, 2015. 256 с.
- Федорова С. И., Чебанова Е. Ф., Артиухин Ю. В.* Реакции продольных профилей и устьев рек бассейнов Азовского и Черного морей на изменчивость природных факторов и техногенное воздействие. Эрозионные и русловые процессы, 2010. Т. 5. С. 387–406.
- Чалов Р. С., Камышев А. А.* Морфодинамика и гидроморфология речных русел как разделы учения о русловых процессах. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2020. Т. 84. № 6. С. 844–854. DOI: 10.31857/S2587556620060047.
- Downing J. A.* Emerging Global Role of Small Lakes and Ponds: Little Things Mean a Lot. Limnetica, 2010. V. 29. No. 1. P. 9–24.
- Dudgeon D., Arthington A. H., Gessner M. O., Kawabata Z., Knowler D. J., Leveque C., Naiman R. J., Prieur-Richard A. H., Soto D., Stiassny M. L., Sullivan C. A.* Freshwater Biodiversity: Importance, Threats, Status and Conservation Challenges. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2006. V. 81. No. 2. P. 163–82. DOI: 10.1017/S1464793105006950.
- Keith D. A., Rodríguez J. P., Brooks T. M., Burgman M. A., Barrow E. G., Bland L., Comer P. J., Franklin J., Link J., McCarthy M. A., Miller R. M., Murray N. J., Nel J., Nicholson E., Oliveira-Miranda M. A., Regan T. J., Rodríguez-Clark K. M., Rouget M., Spalding M. D.* The IUCN Red List of Ecosystems: Motivations, Challenges, and Applications. Conservation Letters, 2015. V. 8. P. 214–226. DOI: 10.1111/conl.12167.
- Knighton D.* Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. Don Mills, Ontario: Oxford University Press, 1998. 383 p.
- Lindsay J. B., Cockburn J. M. H., Russell H. A. J.* An Integral Image Approach to Performing Multi-Scale Topographic Position Analysis. Geomorphology, 2015. V. 245. P. 51–61. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.025.
- Newton A. C.* Strengthening the Scientific Basis of Ecosystem Collapse Risk Assessments. Land, 2021. V. 10. Iss. 11. P. 1252. DOI: 10.3390/land10111252.
- Pogorelov A. V., Laguta A. A., Kiselev E. N., Lipilin D. A.* Features of the Long-Term Transformation of the Krasnodar Reservoir, Near the Mouth of the Kuban River, Russia. Journal of Geographical Sciences, 2021. V. 31. P. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.
- Pogorelov A. V., Laguta A. A., Netrebin P. B., Lipilin D. A.* Analysis of the Bottom Topography of the Reservoir Due to Sediment Trapping (According to the Krasnodar Reservoir, Russia). Geography, Environment, Sustainability, 2023. V. 16. No. 3. P. 102–112. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-2907.
- Schumm S. A.* The Fluvial System. New York: John Wiley & Sons, 1977. 338 p.

REFERENCES

- Bashinsky I. V., Kadetov N. G., Senkevich V. A., Stoyko T. G., Katsman E. A. Osipov V. V. Transformations of floodplain water body ecosystems under conditions of modern natural and anthropogenic changes and possible conservation strategies. *Advances in Current Biology*, 2024. V. 144. No. 1. P. 80–96 (in Russian). DOI: 10.31857/S0042132424010063.
- Chalov R. S., Kamyshev A. A. Concepts of Hydromorphology and River Morphodynamics in Riverbed Processes Science. *Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya* (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series), 2020. V. 84. No. 6. P. 844–854 (in Russian). DOI: 10.31857/S2587556620060047.
- Downing J. A. Emerging Global Role of Small Lakes and Ponds: Little Things Mean a Lot. *Limnetica*, 2010. V. 29. No. 1. P. 9–24.
- Drovovozova T. I., Panenko N. N. Ecological State of Small Rivers of the Rostov Region. *Ecology and Water Management*, 2019. No. 1(01). P. 1–17 (in Russian).
- Dudgeon D., Arthington A. H., Gessner M. O., Kawabata Z., Knowler D. J., Leveque C., Naiman R. J., Prieur-Richard A. H., Soto D., Stiassny M. L., Sullivan C. A. Freshwater Biodiversity: Importance, Threats, Status and Conservation Challenges. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006. V. 81. No. 2. P. 163–82. DOI: 10.1017/S1464793105006950.
- Fedorova S. I., Chebanova E. F., Artyukhin Yu. V. Responses of Longitudinal Profiles and River Mouths of the Azov and Black Sea Basins to the Variability of Natural Factors and Anthropogenic impact. *Erosion and Riverbed Processes*, 2010. V. 5. P. 387–406 (in Russian).
- Gudymovich S. S. River Terraces (Some Comments on Morphology, Genesis and Classification). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2005. V. 308. No. 5. P. 57–61 (in Russian).
- Keith D. A., Rodríguez J. P., Brooks T. M., Burgman M. A., Barrow E. G., Bland L., Comer P. J., Franklin J., Link J., McCarthy M. A., Miller R. M., Murray N. J., Nel J., Nicholson E., Oliveira-Miranda M. A., Regan T. J., Rodríguez-Clark K. M., Rouget M., Spalding M. D. The IUCN Red List of Ecosystems: Motivations, Challenges, and Applications. *Conservation Letters*, 2015. V. 8. P. 214–226. DOI: 10.1111/conl.12167.
- Knighton D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. Don Mills, Ontario: Oxford University Press, 1998. 383 p.
- Kondratiev N. E., Popov I. V., Snishchenko B. F. Fundamentals of the Hydromorphological Theory of Channel Processes. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 272 p. (in Russian).
- Kosolapov A. E., Dandara N. T., Kapustin M. V. On the Development of a Methodology for Preparing Comprehensive Plans for the Restoration and Sustainable Functioning of Small and Medium-Sized River Basins. *Society. Environment. Development*, 2017. No. 3. P. 96–90 (in Russian).
- Laguta A. A., Pogorelov A. V. On the Reconstruction of the Landforms of the Ancient Embanked Floodplain Based on Airborne Laser Scanning Data (Krasnodar). Resistance of Natural Landscapes and their Components to External Influences. Collection of Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Grozny, 2024. P. 338–342 (in Russian).
- Lindsay J. B., Cockburn J. M. H., Russell H. A. J. An Integral Image Approach to Performing Multi-Scale Topographic Position Analysis. *Geomorphology*, 2015. V. 245. P. 51–61. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.025.
- Lurye P. M., Panov V. D. Rivers of the Azov Sea Basin: Hydrography and Flow Regime. Rostov-on-Don: Donskoy Publishing House, 2021. 672 p. (in Russian).

- Makarevich A. A., Yarotov A. E.* River Runoff and Channel Processes. Minsk: BSU, 2019. 115 p. (in Russian).
- Makkaveev N. I.* River Channel and Erosion in its Basin. Moscow: Academy of Sciences of USSR, 1955. 347 p. (in Russian).
- Makkaveev N. I.* Runoff and Channel Processes. Moscow: Moscow University Press, 1971. 116 p. (in Russian).
- Newton A. C.* Strengthening the Scientific Basis of Ecosystem Collapse Risk Assessments. Land, 2021. V. 10. Iss. 11. P. 1252. DOI: 10.3390/land10111252.
- Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A., Reshetnyak O. S.* Rivers of Russia in Emergency Environmental Situations. Rostov-on-Don: SEC, 2006. 308 p. (in Russian).
- Pogorelov A. V., Laguta A. A., Kiselev E. N., Lipilin D. A.* Features of the Long-Term Transformation of the Krasnodar Reservoir, Near the Mouth of the Kuban River, Russia. Journal of Geographical Sciences, 2021. V. 31. P. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.
- Pogorelov A. V., Laguta A. A., Netrebin P. B., Lipilin D. A.* Analysis of the Bottom Topography of the Reservoir Due to Sediment Trapping (According to the Krasnodar Reservoir, Russia). Geography, Environment, Sustainability, 2023. V. 16. No. 3. P. 102–112. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-2907.
- Pogorelov A. V., Lipilin D. A., Dudkina A. A., Kopaneva O. V.* On Technogenic Transformations of the River Network on the Azov-Kuban Plain (Chelbas, Albashi Rivers). InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference, 2022. V. 28. Part 2. P. 567–582 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-567-582.
- Pogorelov A. V., Lipilin D. A., Kiselev E. N.* On Changes in the Hydrographic Characteristics of Rivers in Steppe Agrolandscapes over the Past Decades (on the Example of the Beysug River Basin, Krasnodar Territory). InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference, 2021. V. 27. Part 4. P. 19–32 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-19-32.
- Pogorelov A. V., Lipilin D. A., Kuzyakina M. V.* On Technogenic Degradation of River Systems in the Eastern Azov Region: Hydrographic Aspect. Geology and Geophysics of Russian South, 2024. V. 14. No. 3. P. 243–259 (in Russian). DOI: 10.46698/i4469-5379-6925-p.
- Schumm S. A.* The Fluvial System. New York: John Wiley & Sons, 1977. 338 p.
- Surface Water Resources of the USSR. V. 8. North Caucasus. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 447 p. (in Russian).
- Suslov O. N.* Steppe Rivers of Krasnodar Region. Krasnodar: Kuban State Agrarian University, 2015. 256 p. (in Russian).
- Suzdaleva A. L., Goryunova S. V.* Technogenesis and Degradation of Surface Water Bodies. Moscow: Energy, 2014. 456 p. (in Russian).
- Suzdaleva A. L., Goryunova S. V.* General Scheme of Development of the Process of Anthropogenic Degradation of Water Bodies. National Association of Scientists (NAS). Technical Sciences, 2015. No. IV (9). P. 92–95 (in Russian).
- Vekshina T. V., Bolshakov V. A., Korinets E. M.* Environmental Problems of Shipping River Beds: Study Guide. St. Petersburg: Mediapapir, 2022. 132 p. (in Russian).