ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

SOIL EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES

№ 2

апрель – июнь 2025 г.

No. 2

April – June 2025

УДК 911
ББК 26.8
Э 81

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. М. – 2025. – № 2. – 80 с.

Журнал освещает вопросы исследования:
- теоретических и экспериментальных механизмов эрозионных и русловых процессов;
- проявления эрозии и русловых процессов в различных природных и природно-антропогенных условиях;
- формирования и движения речных наносов, их геохимических и экологических проявлений;
- исследования эффективности различных средств борьбы с эрозией;
- управления русловыми процессами и регулирования русел рек;
- устьевых процессов;
- воздействия хозяйственной деятельности на эрозионно-русловые системы.

Журнал координируется Межвузовским научно-координационным советом по эрозионным, русловым и устьевым процессам и лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

СОСТАВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА «ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С.Р. Чалов – д-р геогр. наук, профессор кафедры гидрологии суши, заведующий научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

О.А. Макаров – д-р биол. наук, заведующий кафедрой эрозии и охраны почв, факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

М.М. Иванов – канд. геогр. наук, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник (г. Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д-р техн. наук **В.В. Беликов**, заведующий лабораторией численного гидродинамического моделирования, главный научный сотрудник, Институт водных проблем РАН (г. Москва, Россия)

канд. геогр. наук **Ю.Р. Беляев**, кафедра геоморфологии и палеогеографии, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент (г. Москва, Россия)

д-р техн. наук **Г.Л. Гладков**, кафедра водных путей и водных изысканий, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, заведующий (г. Санкт-Петербург, Россия)

д-р геогр. наук **В.Н. Голосов**, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **А.К. Дарвишан**, кафедра управления водосборными бассейнами, факультет природных ресурсов, Университет Тарбиат Модарес, профессор (г. Тегеран, Иран)

д-р биол. наук **В.В. Демидов**, кафедра эрозии и охраны почв, факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор (г. Москва, Россия)

д-р геогр. наук **О.П. Ермолаев**, кафедра ландшафтной экологии, Институт экологии, биотехнологии и природопользования, Казанский федеральный университет, профессор (г. Казань, Россия)

канд. геогр. наук **А.П. Жидкин**, лаборатория эрозии почв, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, заведующий (г. Москва, Россия)

канд. геогр. наук **А.С. Завадский**, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **М. Златич**, факультет лесного хозяйства, Белградский университет, профессор (г. Белград, Сербия)

канд. техн. наук **В.М. Католиков**, отдел русловых процессов, Государственный гидрологический институт, заведующий (г. Санкт-Петербург, Россия)

д-р биол. наук **Г.С. Куст**, отдел физической географии и проблем природопользования, Институт географии РАН, главный научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **Э. Латрубесс**, программа аспирантуры по экологическим наукам, Федеральный университет штата Гояс, профессор (г. Гояния, Бразилия)

д-р геогр. наук **Ф.Н. Лисецкий**, кафедра природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, профессор (г. Белгород, Россия)

д-р **Лю Шугуан**, кафедра гидротехники, факультет гражданского строительства, Университет Тунцзи, профессор (г. Шанхай, Китай)

д-р **М. Маеркер**, факультет наук о Земле и окружающей среде, Павийский университет, профессор (г. Павия, Италия)

д-р **Ж. Минелла**, кафедра почвоведения, Федеральный университет Санта-Марии, профессор (г. Санта-Мария, Бразилия)

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук **А.В. Панин**, отдел палеогеографии четвертичного периода, Институт географии РАН, заведующий, заместитель директора (г. Москва, Россия)

д-р **С.Х. Садеги**, кафедра управления водосборными бассейнами, факультет природных ресурсов, Университет Тарбиат Модарес, профессор (г. Тегеран, Иран)

д-р геогр. наук **А.Ю. Сидорчук**, лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник (г. Москва, Россия)

д-р **В. Спалевич**, биотехнический факультет, Университет Черногории, профессор (г. Подгорица, Черногория)

д-р **А. Цыпленков**, научно-исследовательский институт «Manaaki Whenua — Landcare Research», научный сотрудник (г. Палмерстон Норт, Новая Зеландия)

д-р геогр. наук **Р.С. Чалов**, кафедра гидрологии суши, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор (г. Москва, Россия)

канд. с.-х. наук **А.Н. Червань**, кафедра почвоведения и ГИС, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет, заведующий (г. Минск, Беларусь)

д-р **М. Шлеттерер**, институт гидробиологии и управления водными экосистемами, Университет природных ресурсов и наук о жизни, профессор (г. Вена, Австрия)

КООРДИНАТОР РЕДАКЦИИ

канд. геогр. наук **Е.Д. Павлюкевич,** лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

РЕДАКТОР-КОРРЕКТОР **Р.М. Синаюк**

ОРИГИНАЛ-МАКЕТ И ДИЗАЙН **Л.В. Езерова**

ФОТО НА 1-й ОБЛОЖКЕ, стр. 1, 6 и 7: Половодье на реке Быстрый Танып, Башкирия, 2022 год.
(Фото: Данила Игоревич Школьный, н.с. кафедры гидрологии суши и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова)

АДРЕС РЕДАКЦИИ

119619 Россия, Москва, улица Лазенки 6-я, д. 2, стр. 15

E-mail: eprp@geogr.msu.ru

Сайт: https://journal.sediment.ru/

УЧРЕДИТЕЛЬ

Общество с ограниченной ответственностью «Экспертная лаборатория «Гидроинформационные системы»

© Редколлегия журнала «Эрозия почв и русловые процессы» (составитель), 2025

© ООО «Экспертная лаборатория «Гидроинформационные системы», 2025

ISSN (PRINT) 3034-4638

Журнал основан в 2024 году

Периодичность издания — 4 раза в год

UDC 911
BBC 26.8
Э 81

SOIL EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES. M. – 2025. – No 1. – 80 p.

The journal covers research on theoretical and experimental mechanisms of erosion and river channel processes, as well as the evolution of these processes in various natural and anthropogenic environments. It also explores the development of new methods for erosion mitigation applicable to multiple branches of the economy and examines the effectiveness of different erosion control measures. The journal is coordinated by the Interacademic Scientific Council for Erosion, Channel and Estuarine Processes.

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF
Prof. Dr. S.R. Chalov

DEPUTY EDITOR
Prof. Dr. O.A. Makarov

EXECUTIVE SECRETARY
Dr. M.M. Ivanov

EDITORIAL BOARD
Dr. V.V. Belikov, Dr. Yu.R. Belyaev, Prof. Dr. R.S. Chalov, Dr. A.N. Chervan, Dr. A.K. Darvishan (Iran), Prof. Dr. V.V. Demidov, Prof. Dr. O.P. Ermolaev, Prof. Dr. G.N. Gladkov, Dr. V.N. Golosov, Dr. G.S. Kust, Prof. Dr. E. Latrubesse (Brazil), Prof. Dr. F.N. Lisetsky, Prof. Dr. M. Maerker (Italy), Prof. Dr. J.P.G. Minella (Brazil), Dr. A.V. Panin, Prof. Dr. S.H. Sadeghi (Iran), Prof. Dr. M. Schletterer (Austria), Prof. Dr. Liu Shuguang (China), Dr. A.Yu. Sidorchuk, Prof. Dr. V. Spalevic (Montenegro), Dr. A. Tsyplenkov (New Zealand), Dr. A.S. Zavadsky, Dr. A.P. Zhidkin, Prof. Dr. M. Zlatic (Serbia)

BOARD COORDINATOR
Dr. E.D. Pavlyukevich

EDITOR-PROOFREADER R.M. Sinaiuk

ORIGINAL LAYOUT AND DESIGN L.V. Ezerova

PHOTO ON THE 1ST COVER & pages 1, 6, 7 – Flood on the Bystry Tanyp River, Bashkiria, 2022 (photo by Danila Shkolnyi, researcher of the Department of Land Hydrology and The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University)

POSTAL ADDRESS
119619 Russia, Moscow, 6th Lazenki Street, 2, Bldg. 15
E-mail: eprp@geogr.msu.ru

https://journal.sediment.ru/

FOUNDER
Limited Liability Company "Expert Laboratory "Hydroinformational Systems"

© Editorial Board of the journal "Soil Erosion and River Channel Processes" (issuer), 2025
© Expert Laboratory "Hydroinformational Systems" LLC, 2025

ISSN (PRINT) 3034-4638

The journal was founded in 2024
Published 4 times a year

ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Вторая часть тематического сборника трудов членов Межвузовского научно-координационного совета по эрозионным, русловым и устьевым процессам (первая часть опубликована в номере 1 за 2025 год) освещает три тематики: региональные исследования русловых процессов (р. Амур, р. Белая, реки Крыма); вопросы исследований перераспределения наносов и миграции химических веществ (р. Янцзы; р. Ока) и вопросы влияния русловых процессов и их антропогенного изменения на условия судоходства.

В данный номер журнала вошло 6 статей, представляющих труды ученых МГУ имени М.В. Ломоносова, Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, Института водных и экологических проблем ДВО РАН и университета Тунцзи (КНР), а также представителей воднотранспортных вузов – Волжского государственного университета водного транспорта и Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. В номере впервые в непродолжительной истории журнала публикуется англоязычная статья – авторов из КНР, которая одновременно открывает публикации, посвященные гидрогеохимическим исследованиям русловых процессов.

Журнал с этого года индексируется в РИНЦ. На новом сайте журнала скоро появится информация о специальных выпусках, которые будем издавать в ближайшее время. А авторов приглашаем активно использовать возможности публикации онлайн-приложений, в том числе видеоприложений, что повышает читаемость работ.

Профессор, д.г.н.,
заведующий НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева *С.Р. Чалов*

СОДЕРЖАНИЕ

Е.Р. Чалова, Р.С. Чалов. КАРТА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ИХ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РЕКАХ КРЫМА 8

Р.С. Чалов, А.Н. Махинов, А.В. Чернов, В.В. Иванов. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СРЕДНЕМ И НИЖНЕМ АМУРЕ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В МОРФОЛОГИИ РУСЛА И ПОЙМЫ 18

А.Ю. Воробьев, В.А. Кривцов, А.В. Водорезов, А.Н. Варнаков, А.С. Кадыров. ПОЛЕВОЙ МОНИТОРИНГ АЛЛЮВИАЛЬНОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ПОЙМЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. ОКИ 33

Ша Лоу (沙楼), Юйвэнь Цзоу (宇文邹), Шугуан Лю (曙光 刘 / 柳 / 留), Гуйхуэй Чжун (桂辉 钟 / 仲 / 忠), Чжижуй Чжан (智瑞 张 / 章). ФАКТОРЫ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ Р. ЯНЦЗЫ 51

Ю.Е. Воронина. РАЗРАБОТКА РУСЛОВЫХ И ПОЙМЕННЫХ КАРЬЕРОВ НА р. ВЕРХНЕЙ БЕЛОЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА И УСЛОВИЯ СУДОХОДСТВА 58

Г.Л. Гладков. ВНУТРЕННИЕ ВОДНЫЕ ПУТИ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА СВОБОДНЫХ И ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ РЕКАХ 68

CONTENTS

E.R. Chalova, R.S. Chalov. MAP OF CHANNEL PROCESSES AND THEIR CHANGES UNDER HUMAN IMPACT ON THE CRIMEA RIVERS 8

R.S. Chalov, A.N. Mahinov, A.V. Chernov, V.V. Ivanov VERTICAL CHANNEL DEFORMATIONS ON THE MIDDLE AND LOWER AMUR RIVER AND THEIR REFLECTION IN THE MORPHOLOGY OF THE CHANNEL AND FLOODPLAIN 18

A.Y. Vorobyov, V.A. Krivtsov, A.V. Vodorezov, A.N. Varnakov, A.S. Kadyrov. FIELD MONITORING OF ALLUVIAL SEDIMENT ACCUMULATION IN THE OKA RIVER FLOODPLAIN (IN THE MIDDLE PART OF THE ITS BASIN) 33

Sha Lou, Yuwen Zou, Shuguang Liu, Guihui Zhong, Zhirui Zhang. INFLUENCING FACTORS OF HEAVY METALS IN THE COASTAL AREAS OF YANGTZE RIVER ESTUARY 51

Yu.E. Voronina. DEVELOPMENT OF CHANNEL AND FLOODPLAIN QUARRY ON THE VERKHNYAYA BELAYA RIVER AND THEIR INFLUENCE ON CHANNEL DEFORMATIONS AND NAVIGATION CONDITIONS 58

G.L. Gladkov. INLAND WATERWAYS OF RUSSIA: PROBLEMS OF HYDROLOGICAL REGIME AND CHANNEL PROCESSES ON FREE AND REGULATED RIVERS 68

УДК 551.4

КАРТА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ИХ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РЕКАХ КРЫМА

Е.Р. Чалова, Р.С. Чалов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ekar28@yandex.ru, rschalov@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2025
После доработки 24.02.2025
Принята к публикации 28.02.2025

Аннотация. Впервые составлена крупномасштабная карта русловых процессов на реках полуострова Крым, территория которого по своим природным условиям и антропогенному воздействию значительно отличается от других регионов России. Отмечена связь морфологии русел, пойм, руслообразующих наносов с геолого-геоморфологическими и гидрологическими природными условиями, а также с сильнейшим антропогенным воздействием, восходящим к IV в. до н. э. и связанным как с забором воды, так и с техногенным преобразованием русел. Выделено шесть районов Крыма, различающихся по условиям формирования и русловому режиму рек. Приводятся сведения о длине рек, их уклонах, трансформации речных русел, паводочном режиме и селеактивности, о проведенных гидротехнических мероприятиях (канализирование рек, берегоукрепление, создание водохранилищ и др.). Анализ результатов исследований, в том числе составленной карты, определил необходимость изучения влияния массового антропогенного вмешательства на условия формирования речных русел с целью предотвращения или нейтрализации его негативных экологических последствий.

Ключевые слова: русловые процессы, картографирование, морфодинамический тип русла, районирование, антропогенное воздействие

DOI: 10.71367/3034-4638-2025-2-2-8-17

ВВЕДЕНИЕ

Картографический метод при исследовании русловых процессов был разработан и стал применяться во второй половине XX в. сначала в крупном масштабе и в основном на больших реках, точнее их участках, для комплексной оценки условий и морфологии речных русел с целью обоснования рекомендаций по их регулированию. В 70–80-е гг. был предложен подход к мелкомасштабному картографированию территорий, приведший к составлению карт русловых процессов на территории бывшего СССР и европейской его части (масштаб 1:4000000 и 1:2000000) (Русловые процессы..., 1990; Морфология и динамика..., 1999), а также Алтайского региона и Ханты-Мансийского автономного округа (Русловые процессы..., 1991; Атлас..., 2005). При этом большие и средние реки (критерий отбора определялся масштабом карты) на них показываются в виде лент-диаграмм ширины русла вдоль топографического изображения, на которых отображаются морфодинамический тип русла, состав руслообразующих наносов, интенсивность русловых деформаций и другие характеристики речных русел и пойм, тогда как для остальных рек использовалось районирование территории по геолого-геоморфологическим условиям формирования и распространению равнинных, полугорных и горных типов русловых процессов. Основой региональных карт (Алтай, ХМАО-Югра), хотя и более крупного масштаба (1:1000000), все равно оставались большие реки (в данном случае Обь и ее основные притоки) и районирование для малых рек.

Первый опыт составления карты на регион, лишенный больших и даже средних, но относительно крупных рек этой категории, был сделан применительно к территории полуострова Ямал, на карте которого показаны русла большинства малых рек (кроме рек 1–4-го порядков) (Чалов, Чалова, 2024), но масштаб ее уже 1:400000. Этот регион характеризуется естественными русловыми процессами, практически лишенными антропогенных воздействий на сами реки. Среди реги-

онов, в которых абсолютно преобладают малые реки, единичные же средние (по длине и площади бассейна) отличаются малой водностью и даже пересыханием в летнее время и все реки подвержены мощным антропогенным преобразованиям их гидрологического и руслового режима, особо выделяется Крымский полуостров. Благодаря этим особенностям рек Крыма картографирование русловых процессов приобретает специфические черты, а анализ составленной карты позволяет в полной мере оценить масштабы и разнообразие трансформированности речных русел в разных частях полуострова, в горах, предгорьях и в степном Крыму.

Следует иметь в виду, что гидрографии и гидрологии Крыма посвящена довольно обширная литература (Киселева, Прокопов, 2003; Олиферов, Тимченко, 2005; Лисовский, Новик, Тимченко и др., 2011 и др.), в том числе по Горному Крыму в отношении селевой деятельности (Олиферов, 2005). При этом достаточно подробно рассматривается влияние на сток рек массового регулирования его прудами и водохранилищами, водозаборами в оросительные каналы. Косвенно через хозяйственную преобразованность ландшафтов дается оценка их влияния на состояние рек (Ена В., Ена Н., 1971). Однако вне поля зрения остаются русловые процессы на реках, морфология и динамика русел и их преобразованность в условиях такой разносторонней и территориально всеобъемлющей, полностью охватывающей Степной Крым и в очень значительной мере Горный, антропогенной деятельности, в том числе непосредственно в речных руслах или превращающей их в каналы. По существу, единственной работой, где была дана характеристика русловых процессов на реках Крыма с оценкой их измененности, была кандидатская диссертация И.Н. Павлова (1996), а также опубликованная по ее результатам статья (1994), которые в перечисленных выше и в других работах по рекам Крыма даже не упоминаются.

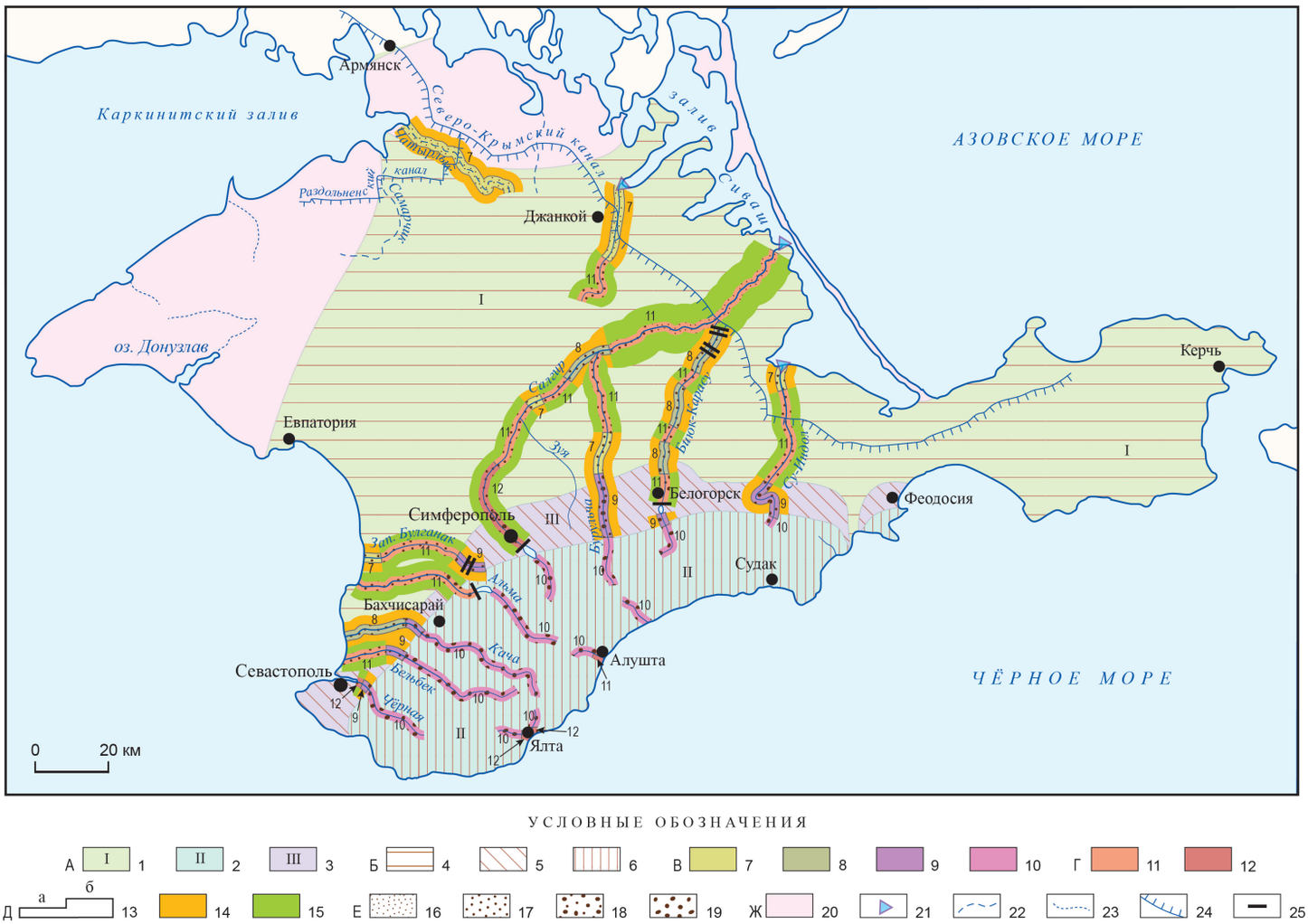
Задача настоящей статьи на основе составления карты русловых процессов на реках Крыма, во-первых, рассмотреть основные принципы их картографирования в условиях очень сильной, массовой антропогенной преобразованности речных русел и, во-вторых, представить полноценную, на современном этапе, характеристику морфодинамики русел рек полуострова и трансформированность на урбанизированных территориях, в результате канализирования, регулирования стока водохранилищами, забора стока в оросительные системы и сплошной сельскохозяйственной освоенности степной части.

МЕТОДИКА КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

При составлении карты Крыма (рис. 1), естественно, использовался весь богатый накопленный опыт по разработке содержания и картографического представления русловых процессов. Специфика региона, масштаб карты, необходимость отражения элементов антропогенного влияния внесли свои коррективы и дополнения в разработанные ранее условные обозначения.

В картографии выработаны методы составления карт, дающих возможность проникнуть в суть картографируемого явления, понять и отобразить на карте закономерности его размещения и причины деформаций (Берлянт, 2001). Методика картографирования русловых процессов, как и любого другого природного явления, предполагает отражение на карте распространения картографируемого объекта, изменения его характеристик во взаимосвязи с изменениями окружающих условий, в данном случае – морфодинамических типов и других показателей речных русел, информации о поймах, руслообразующих наносах и других параметрах на фоне геолого-геоморфологических и гидрологических природных условий и антропогенного воздействия с использованием целого спектра картографических условных обозначений.

«Цветная лента» вдоль топографического изображения реки – линейный знак, толщина которого показывает ширину русла реки по установленной шкале (менее 0.1, 0.1–0.3, 0.3–0.6, 0.6–1.2, 1.2–2.5, 2.5–5, 5–10 и более 10 км). Это достаточно универсальная шкала, отражающая весь спектр размеров рек мира и применяющаяся при составлении как отдельных карт русловых процессов, так и карт в региональных научно-справочных атласах. Реки Крымского полуострова все без исключения имеют ширину русла менее 100 м, поэтому шкала ширин в легенде отсутствует. «Лента» вдоль рек, помимо ширины русла, несет основную тематическую нагрузку – представляет морфодинамические типы русла, выделенные в соответствии с классификацией, разработанной в МГУ (Чалов, 2008). В ней типы русла объединены в несколько групп: широкопойменные, адаптированные и врезанные, равнинные, полугорные и горные, антропогенно измененные. Для наглядности каждой группе соответствует определенный цветовой диапазон (например, широкопойменным руслам – зеленый, врезанным – синий и т. д.), внутри которого каждому типу присвоен свой оттенок. Поскольку количество типов русла достаточно велико, то используемые цветовые оттенки не всегда легко различимы гла-



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Рис. 1. Карта русловых процессов на реках Крыма. Районирование территории: А – по геолого-геоморфологическим условиям формирования русел: 1 – районы свободного развития русловых деформаций (широкопойменные русла), 2 – районы ограниченного развития русловых деформаций (врезанные русла), 3 – районы чередования свободного и ограниченного развития русловых деформаций (широкопойменные, врезанные и адаптированные русла); Б – по гидравлическим условиям формирования русел: 4 – равнинные реки, 5 – полугорные реки, 6 – горные реки. В – морфодинамические типы русла: 7 – пологие и развитые сегментные излучины (продольное смещение), 8 – сегментные крутые, петлеобразные, синусоидальные и пальцеобразные излучины (поперечное и продольно-поперечное смещение), 9 – полугорные русла (без разделения на типы), 10 – горные русла (без разделения на типы). Г – антропогенно измененные русла: 11 – канализованные русла, 12 – урбанизированные участки русел (обвалование, бетонные «лотки», спрямления, берегозащитные сооружения). Д – пойма: 13 – относительная ширина поймы $B_п/b_р$: а) 3–20, б) более 20; условия затопляемости поймы: 14 – редко, слабо и кратковременно затопляемая, 15 – незатопляемая. Е – руслообразующие наносы: 16 – песчано-илистые, 17 – песчаные, 18 – песчано-галечные, 19 – галечные и галечно-валунные. Ж – прочие обозначения: 20 – бессточные области; 21 – дельты; 22 – пересыхающие реки; 23 – балки с временными водотоками; 24 – каналы; 25 – плотины гидроузлов

Fig. 1. Map of channel processes on the Crimea Peninsula rivers. Zoning of the territory: A – according to the geological and geomorphological conditions of channel development: 1 – areas of free channel changes development (wide-floodplain channels), 2 – areas of channel changes development (incised channels), 3 – areas of both free and limited channel changes development (wide-floodplain, incised and adapted channels); Б – according to the hydraulic conditions of channel formation: 4 – lowland rivers, 5 – semi-mountain rivers, 6 – mountain rivers. В – morphodynamic channel types: 7 – gentle and developed segmental bends (longitudinal displacement), 8 – steep segmental, loop-shaped, sinusoidal and finger-shaped bends (transverse and longitudinal-transverse displacement); 9 – semi-mountain channels (without division into types), 10 – mountain channels (without division into types). Г – channels under human impact: 11 – channelized channels, 12 – urbanized channel reaches (bunding, concrete “troughs”, straightening, bank protection structures). Д – floodplain: 13 – relative width of floodplain B_{fp}/b_{ch}: a) 3-20, б) more than 20; conditions of floodplain inundation: 14 – rarely, slightly and short-term flooded, 15 – not flooded. E – riverbed sediments: 16 – sand-silt, 17 – sand, 18 – sand-pebble, 19 – pebble and pebble-boulder. Ж – other designations: 20 – drainless areas; 21 – river deltas; 22 – drying rivers; 23 – gullies with temporary watercourses; 24 – canals; 25 – hydroelectric dams

зом. Поэтому на карте принята система цифровых индексов, сопровождающих каждый выделенный участок русла определенного морфодинамического типа. В данном случае эти индексы повторяют номера соответствующих обозначений в легенде и располагаются не на самой «цветной ленте» русла, а из-за ее небольшой ширины рядом с ней.

Фоном основного содержания карты служит районирование территории полуострова по двум параметрам: по геолого-геоморфологическим и по гидравлическим условиям формирования русел. Для их отображения использованы цветовой фон и различные виды штриховки, соответственно. В результате наложения этих двух параметров четко проявилась их взаимозависимость. Особым фоном выделены бессточные области, где рек нет вообще, а присутствуют лишь редкие балки с временными водотоками, нанесенные на карту мелкопунктирными линиями.

Существенным элементом тематического содержания карты является отображение важных характеристик речных пойм. Пойма показана цветной полосой вдоль «ленты» русла реки. Толщина этой полосы соответствует отмеченной в легенде относительной ширине поймы, а цвет полосы отражает условия затопляемости поймы.

Не менее важный элемент русловых процессов – речные наносы. Для обозначения их состава разработано несколько видов крапа разного размера и формы, который на карте размещается на «цветной ленте» речного русла.

Содержание карты дополняется специальными значками, отмечающими местоположение речных дельт, каналов, плотин гидроузлов.

Линейный масштаб карты делает возможным некоторое варьирование ее физических размеров при размещении на листе нужного формата.

МОРФОЛОГИЯ И АНТРОПОГЕННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РУСЕЛ

Русловые процессы на реках Крыма развиваются на фоне общей маловодности региона (табл. 1), связанной с широким распространением карста в горах и засушливостью климата в северном предгорье и равнинной части полуострова, а в пределах последних – с массовым антропогенным (мелиоративным) преобразованием речных русел. Наиболее крупная река Салгир берет начало в самой высокой части Крымских гор (гора Чатыр-Даг), течет до выхода в Степной Крым на север, после чего (ниже г. Симферополя) поворачивает на северо-восток, пересекает степную зону и впадает в залив Сиваш. Все притоки Салгира в степной части Крыма правобережные, стекающие с гор и, как и главная река – маловодные. Реки, начинающиеся в горах к западу от Салгира, текут в западном направлении и впадают в Черное море. Реки южного побережья очень короткие и вплоть до г. Феодосии на всем протяжении протекают в горах, и лишь некоторые из них перед устьем пересекают узкую прибрежную полосу, имея в ней протяженность 1–1.5 км.

Все реки характеризуются паводочным режимом с длительным меженным летне-осенним периодом. Летом многие реки пересыхают даже в горной области, но особенно в Степном Крыму; на р. Салгир и его притоках в летний период поток иногда отсутствует в течение 3 месяцев. Для рек восточного Крыма (бассейн Салгира) характерно снижение водности от выхода из гор вниз по течению, что связано с массовым водозабором, в основном, в ирригационные каналы и на орошение сельскохозяйственных земель, накладывающимся на потери стока в степной зоне из-за инфильтрации воды в подстилающие грунты и на испарение. В пред-

Таблица 1. Характеристика основных рек Крыма (Лисовский, Новик, Тимченко и др., 2011)

Table 1. Characteristics of the main Crimea rivers (Lisovskij, Novik, Timchenko et al., 2011)

Река	Площадь бассейна, км^2	Длина, км	Среднегодовой расход воды, м^3/с		
			при выходе с гор	в среднем течении	в устье
Салгир	3750	282	2.5	1.29	1.20
Бурульча	241	76	0.461	-	0.1
Биюк-Карасу	1160	86	-	1.41	1.05
Западный Булганак	180	49	0.02	-	0.05
Альма	625	87.8	1.25	0.85	711
Кача	573	69	-	-	1.24
Бельбек	505	63	-	-	2.08
Черная	427	35	1.79	-	-

горной зоне сток регулируется водохранилищами (наиболее крупные из них – Симферопольское на р. Салгир и Белогорское на р. Биюк-Карасу).

Антропогенное влияние на русла рек Крыма восходит корнями к греческим поселениям, датируемым IV в. до н.э. (Рухлов, 1915). Земледелие и садоводство, требовавшие воды, привели к расселению людей вдоль рек южного, западного и северного склонов Крымских гор и той степной части Крыма, по которой протекают основные реки полуострова. При этом хозяйственная деятельность на реках сказывалась по двум направлениям: воздействие на сток и непосредственное техногенное преобразование русел. К настоящему времени создано 10 крупных водохранилищ общим объемом 175 млн м^3 и 400 прудов, орошаемые площади составили свыше 120 тыс. га на 1971 г. – до освоения земель на севере полуострова в связи со строительством Северо-Крымского канала. Для борьбы с паводками, затопляющими узкие и плоские долины рек северного склона и приморские города на реках южного склона гор, производилось массовое обвалование рек, строительство дамб, канализирование русел и превращение их в бетонные лотки в пределах городов и приморских поселков (рис. 1). Эти мероприятия практически прекратили русловые деформации на реках равнинной части и ограничили их в предгорьях и на реках Южного побережья (Ена В., Ена Н., 1971; Киселева, Прокопов, 2003).

По природным условиям формирования русел и русловому режиму реки Крыма группируются в шесть районов (Павлов, 1994): 1) район Южного берега, в который входят небольшие реки (длиной 10–20 км), стекающие на юг с главной гряды Крымских гор (Учан-Су, Дерикойка, Демерджи и др.) и впадающие в Черное море; 2) западный, образованный реками, впадающими в Черное море на западном побережье Крыма, расчленяющими северный склон гор, протекающими между куэстовыми грядами и пересекающими в низовьях узкую полосу прибрежной низменности (Черная, Бельбек, Кача, Альма, Западный Булгунак); 3) восточный (горный и степной), включающий реки, стекающие с северного склона Крымских гор, бóльшую равнинную и предгорную часть бассейна р. Салгир, его притоков и других рек, не каждый год достигающих Азовского моря, залива Сиваш или главной реки; 4) район Степного Крыма (Чатырлак, Самарчик и др.), в который входят реки, не имеющие постоянного течения, их сток полностью формируется в равнинной части полуострова; 5) район Керченского полуострова, где имеются только очень короткие (первые несколько километров) реки с временными водотоками; 6) район Тарханкутского полуострова с отсутствием речной сети (рис. 2).

Южный район охватывает реки, расчленяющие южные склоны Крымских гор (Дерикойка, Демерджи, Учкут, Учан-Су и др.). Их длина колеблется от 2 до 12 км, увеличиваясь на восток вместе с шириной прибрежной полосы. Наиболее развитой речной сетью отличается западная часть южного склона, где выпадает большое количество осадков. Начинаются реки высоко в горах после соединения нескольких горных оврагов, в верховьях которых находятся крупные карстовые источники. Для рек района характерны высокие уклоны (до 190‰ в верховьях), сохраняющиеся почти до впадения в море в западной части и уменьшающиеся в низовьях с отступанием гор от берега моря в центральной и восточной частях. Прорезая в верховьях известняки главной гряды, реки формируют узкие глубокие ущелья со скалистыми, сильно рассеченными крутыми склонами. При пересечении флишевой сланцевой толщи долины расширяются, превращаясь в ящикообразные. Почти на всем протяжении русла рек порожисто-водопадные с валунно-глыбовыми наносами, образующие местами водопады (Учан-Су, Джугджур и др.). В нижнем течении при уменьшении уклонов русла становятся горными с неразвитыми и развитыми аллювиальными формами, галечно-валунными с включениями более крупных обломков, выносимых с гор во время высоких, иногда экстремальных паводков. В межень поток в руслах многих рек почти иссякает, но в паводки при высокой водности приобретает большую транспортирующую и эрозионную способность. Известны случаи, когда за сутки русло размывалось на 0.1–0.2 м с последующим отложением наносов, перекрывающих намного величину размыва. Паводки часто сопровождаются водно-каменными селями, вследствие чего территория Горного Крыма и Южного берега отнесена к категории селеопасных (Олиферов, 2005). Наибольшей селеактивностью отличается восточная часть полуострова, где разрушительные селевые паводки в XX в. фиксировались 8 раз. В западной части они отмечались 4 раза, причем в 1962 г. после такого паводка в устье р. Учан-Су образовался конус выноса в море длиной 60 м, шириной 120 м.

Для предотвращения размывов берегов и ущерба от селей проводятся гидротехнические мероприятия; поэтому на территории многих курортов русла рек превращены в бетонные лотки шириной 5–10 м и высотой 3–4 м. Проводятся также расчистки, спрямления и обвалования русел в окрестностях населенных пунктов.

Реки западного района, впадающие в Черное море (Черная, Бельбек, Кача, Альма, Западный

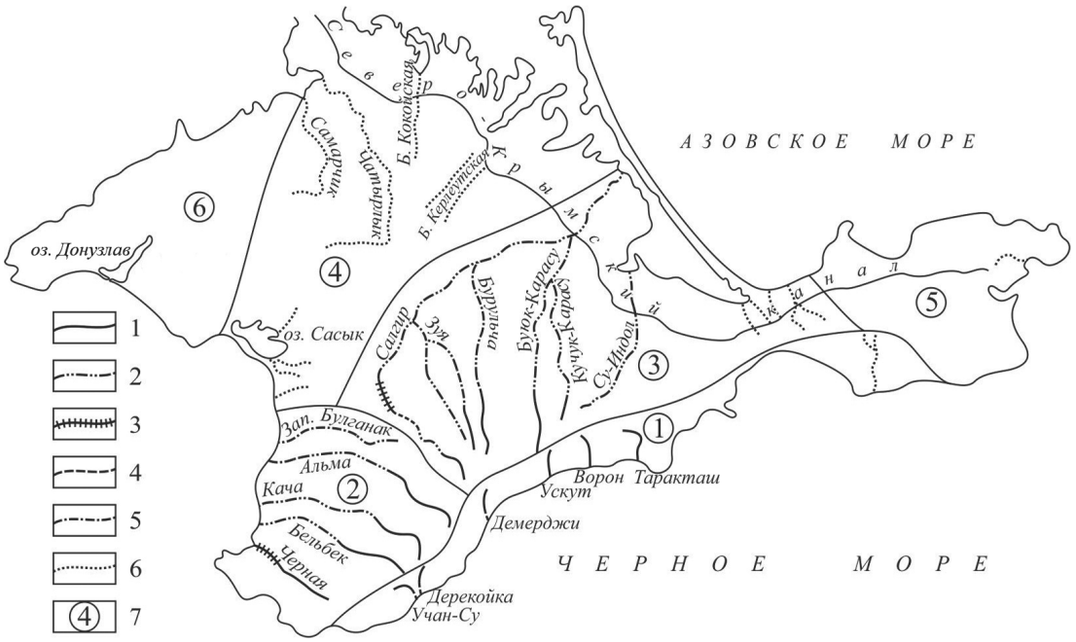


Рис. 2. Районирование Крыма по природным условиям формирования русел и распространению антропогенно измененных русел. 1 – практически неизмененные; 2 – канализованные (без искусственного крепления); 3 – с ограничением горизонтальных деформаций бетонированием берегов (бетонными стенками); 4 – бетонные лотки; 5 – деградировавшие в связи с изъятием стока; 6 – заиливающиеся продуктами эрозии почв; 7 – номера районов (названия в тексте) (по И.Н. Павлову (1994) с изменениями и дополнениями)

Fig. 2. Zoning of the Crimea Peninsula by natural channel formation conditions and distribution of channels under human impact. 1 – nearly unchanged; 2 – channelized (without artificial fixing); 3 – with limitation of planform channel changes by concreting the banks (concrete walls); 4 – concrete troughs; 5 – degraded due to runoff remove; 6 – silting up by soil erosion products; 7 – numbers of areas (names of areas are in the text) (according to I.N. Pavlov (1994) with certain changes and additions)

Булганак), берут начало в западной части северного склона главной гряды Крымских гор, многие – из карстовых источников (у р. Черной расход воды в Сиельском источнике – 1.56 м^3/с). Для них характерна закономерная смена порожисто-водопадных русел горными с неразвитыми и развитыми аллювиальными формами и полугорными. Порожисто-водопадные русла с уклоном более 29–25‰ развиты в верховьях рек; будучи врезанными в известняки, имеют V-образные долины, местами глубокие скалистые каньоны, в которых уклоны увеличиваются до 150–180‰, с мощными скоплениями валунов и глыб, образующих вместе с выступами скальных пород пороги и водопады. Русла с неразвитыми аллювиальными формами расположены в нешироких ящикообразных долинах, образуют врезанные излучины. Руслообразующие наносы представлены средней и крупной галькой с периодически встречающимися скоплениями валунов и глыб.

Ниже по течению русла рек становятся горными с развитыми аллювиальными формами, врезанными на 2–3 м в аллювиальную толщу, заполняющую днище широких долин, с галечными побочнями и осередками. На реках Альме, Каче, Черной и Бельбек в расширениях долин созданы водохранилища (Партизанское и Альминское на Альме). В расширениях долин между куэстовыми грядами русла обвалованные. При пересечении реками второй и третьей гряд Крымских гор долины сужаются, возрастает крупность наносов, увеличиваются уклоны, меняется тип русла в сторону увеличения горности. Участки эти невелики по длине и на всем их протяжении выложены бетонными плитами и обвалованы для защиты от паводков населенных пунктов, садов и дорог. Таким образом, здесь горные реки характеризуются техногенным ограничением русловых деформаций.

Реки района, вытекая из третьей гряды Крымских гор, становятся полугорными, русла их извилистые, сложенные мелкогалечными и галечно-валунными (на перекатах) наносами. Ниже по течению реки становятся равнинными, с четко выраженными плесами и перекатами, меандрирующими,

с песчано-галечным составом руслообразующих наносов. Протяженность равнинных участков рек невелика (первые десятки километров).

Русла полугорных и равнинных рек испытывают наибольшее антропогенное воздействие. Широкие и плоские днища долин заняты под сады, и для борьбы с их затоплением в паводки и размывами берегов русла искусственно спрямлены, смещены к высокому берегу и обвалованы. Это привело к активизации врезания рек, которые врезаны на 3–4 м в днище долины, что в 1.5–2 раза превышает высоту поймы в естественном состоянии. Вся территория насыщена водозаборами, отводящими и подводящими каналами, между которыми в реках в межень поток иссякает. В результате русла зарастают, превращаясь в сточные канавы, заиливаются и часто заполняются бытовыми и строительными отходами.

Восточный район включает в себя бассейн р. Салгир и малые реки к востоку от него. Основная река района – Салгир и ее притоки (Зуя, Салгир, Бурульча, Биюк-Карасу, Кучук-Карасу и Су-Индол) берут начало в центральной и восточной частях главной гряды Крымских гор. От истоков к устью они последовательно меняют тип русла от горного порожисто-водопадного до равнинного, уступая в водоносности рекам западного района, несмотря на большую длину и площадь бассейна (особенно Салгир). Некоторые реки (Кучук-Карасу) начинаются от карстовых источников с дебитом до 1 м^3/с. Многие реки летом пересыхают, пересекая обширное степное пространство и теряя сток на испарение, инфильтрацию и, главным образом, в водозаборы оросительных каналов.

Порожисто-водопадные русла характерны для верховий рек в горной части района, имеющих крутые продольные профили (уклоны более 25–30‰), V-образные долины и галечно-валунные наносы. На Салгире и Бурульче они свойственны и участкам более высоких порядков и с меньшими уклонами; при пересечении куэстовых хребтов русло сужается скалами и приобретает облик скальных лотков. Для участков русел с неразвитыми аллювиальными формами характерно образование на галечно-валунных отмелях известковой цементирующей корки (Бугульча, Зуя), что связано с повышенной карбонатностью вод Крыма, карстовыми процессами и повышенной минерализацией воды в межень, проявляющимися в условиях маловодности рек. На реках с этим типом русла имеется два водохранилища – на Биюк-Карасу и на Зуе. Последнее обеспечивает водоснабжение населенных пунктов, и из него не производятся попуски. В результате в нижнем бьефе оно заросло и заполнено склоновым материалом на протяжении 15 км, после чего за счет фильтрационных и сточных вод превратилось в сточную канаву со слоем ила 0.3–0.4 м.

В предгорной зоне (уклоны 5–7‰) долины рек резко расширяются, русла становятся широкопойменными, ширина русел увеличивается с 3–4 до 8–15 м, а сами русла сначала остаются горными, но с развитыми аллювиальными формами, а затем становятся полугорными и равнинными.

На реках восточного района преобладает их равнинная часть; на Салгире она составляет более 75% длины реки. Почти все реки уже в предгорьях пересыхают летом, а Биюк-Карасу и Су-Индол в низовьях перехватываются Северо-Крымским каналом. Салгир только в верховьях имеет горное русло. На остальном протяжении вплоть до г. Симферополя (выход реки на равнину) русло полугорное (22% длины реки). Наносы в предгорной зоне в основном мелко- и среднегалечные или песчано-галечные, образующие короткие аллювиальные поля между горами и предгорьями, где резко расширяется долина и проходит граница, разделяющая реки по характеру русловых процессов на естественные и антропогенно измененные. В последнем случае помимо водохранилищ распространены и другие виды воздействий на русла: спрямление, обвалование, расчистка, канализирование, водозаборы и различные гидротехнические сооружения. На Салгире в г. Симферополе и его окрестностях произведено бетонирование дна и берегов реки.

В равнинной части р. Салгир русло только ниже г. Симферополя сохраняет относительно естественный облик, образуя сегментные излучины при соотношении $B_п/b_р$ от 4 до 10 ($b_р$ = 7–8 м, $B_п$ = 30–40 м), но и здесь, поскольку река протекает среди следующих один за другим населенных пунктов, русло в значительной степени подвержено свойственному урбанизированным территориям воздействию берегозащитных и противопаводковых сооружений. Поворачивая на северо-восток, река почти на всем протяжении (за исключением 25–30-километрового участка выше и ниже слияния с р. Бурульча и короткого приустьевого отрезка, где русло извилистое) либо спрямлена, либо превращена в систему прямолинейных каналов с поворотами под прямыми углами. В районе устья правого притока – р. Биюк-Карасу – река пересекает Северо-Крымский канал, из которого (при его функционировании) в Салгир сбрасывались коллекторные воды. В стороне от каналов в рельефе иногда сохраняются слабо выраженные ложбины – следы бывших крутых излучин русла.

Аналогичные изменения русел характерны для притоков Салгира – Зуи, Бурульчи, Биюк-Карасу, а также для р. Су-Индол, самостоятельно впадающей в Сиваш. При этом р. Биюк-Карасу фактически перехватывается Северо-Крымским каналом и не впадает в Салгир.

Регулирование стока водохранилищами и прудами, спрямление и превращение русел в каналы привели к врезанию рек и трансформации их из широкопойменных в антропогенно обусловленные врезанные, хотя величина врезания относительно невелика из-за существенного уменьшения водоносности рек вследствие распределения стока по каналам. В населенных пунктах сооружены различные дамбы, запруды, водохранилища и пруды, в том числе сбоку от них – наливные. Из-за этого русла рек зарастают, заиливаются (слой ила до 1 м), в межень реки пересыхают, происходит их деградация.

К степному району принадлежат малые и маловодные реки, стекающие с Тарханкутского поднятия и текущие на север (в Каркинитский залив) и на юг (в Евпаторийский залив). Среди них выделяется р. Чатырлак с меандрирующим руслом; остальные реки теряются в сухих степях, образуя слепые устья.

На Керченском полуострове реки имеют поперечное и продольное по отношению к его оси направление. Их эрозионно-аккумулятивная деятельность проявляется лишь в верхнем течении. Большинство рек практически не достигают Черного моря или Сиваша, исчезая в степи. Как и в степном районе, их долины и пологие склоны распахиваются, захватывая и само русло и приводя к исчезновению самих рек.

На Тарханкутском полуострове речная сеть отсутствует, но, представляя собой относительное поднятие, его территория характеризуется несколькими врезанными в него долинами-балками, борта которых расчленены оврагами. Водотоки в них появляются лишь при выпадении дождей (поздней осенью, зимой, ранней весной, в некоторых из них в плесах сохраняются летом озера), образуя подобие врезанных русел благодаря консервации создаваемых ими форм. Наиболее крупная врезанная балка с извилистыми очертаниями (врезанные излучины) имеет длину около 20 км и впадает в Каркинитский залив у с. Черноморского. В вершину длинного (около 25 км) узкого эстуаровидного залива Донузлав также впадает извилистая врезанная балка с временным водотоком. Прямолинейные очертания имеет балка, впадающая в прибрежное озеро возле Каркинитского залива (у с. Межводное).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые составлена карта русловых процессов на реках Крыма, отражающая как естественные условия формирования речных русел, так и их антропогенную преобразованность. В основу ее создания положена разработанная еще в конце XX в. методология картографирования русловых процессов (Чалов, 1990), однако последний аспект (антропогенная преобразованность), проявляющийся в Крыму практически повсеместно, в том числе на реках в горах, привел к необходимости внесения новых элементов в принципы и легенду составленной карты. Наряду с традиционным подходом – районирование территории по распространению горных, полугорных и равнинных рек, геолого-геоморфологическим условиям развития русловых деформаций, линейный (вдоль топографического изображения гидросети) показ морфодинамических типов русла, распространения пойм, состава руслообразующих наносов и т. д. – уже на самой карте расширена легенда за счет русел канализированных и на урбанизированных территориях, территорий с массовым распространением оросительных каналов, забирающих воду из рек, гидроузлов, водохранилища которых из-за масштаба не могут быть показаны на карте. Однако этого тоже оказалось недостаточно, что привело к составлению отдельной карты – аналога карты-врезки с районированием территории полуострова по совокупности природных условий формирования русел (такой подход был ранее применен при составлении карты русловых процессов на реках Алтайского региона (Русловые процессы..., 1991)), с одной стороны, и с детальной оценкой антропогенных изменений речных русел, с другой.

Выполненное обобщение имеющихся материалов и результатов исследований и анализ составленных карт (карты русловых процессов и карты-врезки) показали определенную уникальность Крыма в отношении естественных условий формирования речных русел (маловодность абсолютно всех рек региона, пересыхание многих из них даже в пределах гор) и особенно в части массовой антропогенной их преобразованности вследствие как регулирования и изъятия стока, так и разнообразных техногенных воздействий от берегозащитных сооружений до превращения рек в каналы, распашки земель (в том числе бывших пойменных или захватывающих сами русла), приводящей к заилению рек продуктами эрозии почв и нередко к полному их исчезновению. Неблагоприятные или негативные экологические последствия таких преобразований, которые требуют специального изучения, оценок и обоснования мер по их снижению или нейтрализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Т. 2. Природа и экология Ханты-Мансийского округа. Изд-во ХМАО. 2005. 152 л.

Берлянт А.М. Картография. М.: Аспект Пресс. 2001. 336 с.

Ена В.Г., Ена Н.М. Преобразование ландшафтов Крыма за годы Советской власти // Природные и трудовые ресурсы Левобережной Украины и их использование. Т. 10. М. 1971. С. 48–61.

Киселева Г.А., Прокопов Г.А. Выделение участков реки с разной степенью антропогенных преобразований (на примере р. Салгир) // Устойчивый Крым. Водные ресурсы. Симферополь: Таврида. 2003. С. 135–141.

Лисовский А.А., Новик В.А., Тимченко З.В., Мустафаева З.Р. Поверхностные водные объекты Крыма (справочник). Симферополь: Роскомводхоз АРК. 2011. 114 с.

Морфология и динамика русел рек Европейской части России и сопредельных государств. М-б 1:2000000. М.: Фед. служба геодезии и картографии. 1999. 4 л.

Олиферов А.Н. Селевые явления в Крыму как чрезвычайные экологические ситуации // Геополитика и экодинамика регионов. 2005. Вып. 1. С. 39–46.

Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля. 2005. 216 с.

Павлов И.Н. Реки Крыма: типы русла и их экологическая оценка // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1994. № 3. С. 78–85.

Павлов И.Н. Сравнительный анализ русловых процессов рек различной водоносности в горно-предгорно-равнинных регионах и их антропогенные изменения (на примере рек Крыма и Алтая). Автореф. дисс. ...уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1996. 29 с.

Русловые процессы на реках СССР. М-б 1:4000000. М.: ГУГК СССР. 1990. 4 л.

Русловые процессы на реках Алтайского края. М-б 1:1000000. М.: ГУГК СССР. 1991. 1 л.

Рухлов Н.В. Обзор речных долин горной части Крыма. Петроград. 1915. 491 с.

Чалов Р.С. Русловые процессы на реках СССР и методика их мелкомасштабного картографирования // Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 10. Русловые процессы и наносы. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. С. 259–266.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 608 с.

Чалов Р.С., Чалова Е.Р. Русловые процессы на реках полуострова Ямал и их картографирование // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34. Вып. 3. С. 308–314.

ОБ АВТОРАХ

Чалова Екатерина Романовна. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Кандидат географических наук, инженер Лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ. ekar28@yandex.ru

Чалов Роман Сергеевич. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши, гл. н. с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ. rschalov@mail.ru

MAP OF CHANNEL PROCESSES AND THEIR CHANGES UNDER HUMAN IMPACT ON THE CRIMEA RIVERS

E.R. Chalova, R.S. Chalov

M.V. Lomonosov Moscow State University
ekar28@yandex.ru, rschalov@mail.ru

Abstract. For the first time, a large-scale map of channel processes on rivers of the Crimean Peninsula is created, the territory of which in its natural conditions and anthropogenic impact significantly differs from other regions of Russia. The connection between channel and floodplain morphology and riverbed sediments with geological, geomorphological and hydrological natural conditions is reviewed, as well as with the strongest human impact dating back to the 4th century BC and associated both with water intake and with technogenic transformation of river channels. Six regions of the Crimea Peninsula, differing in the conditions of channel formation and channel regime, are marked. The data on the length of rivers, their slopes, river channel changes, flood regime and mudflow activity, on the hydraulic engineering measures (river canalization, bank protection, creation of water reservoirs, etc.) is provided. The analysis of research results, including the created map, determined the need to study the influence of massive human intervention on the conditions of river channels formation in order to prevent or neutralize its negative environmental consequences.

Keywords: channel processes, mapping, morphodynamic channel type, geographic zonation, human impact

REFERENCES

Atlas of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra. Vol. 2. Nature and Ecology of the Khanty-Mansiysk District. Izd-vo HMAO. 2005. 152 p. (in Russ)

Berlyant A.M. Cartography. M.: Aspekt Press. 2001. 336 p. (in Russ)

Chalov R.S. Channel processes on the USSR rivers and methodology of their small-scale mapping // Tr. V Vsesoyuz. gidrol. S"ezda. Vol. 10. Ruslovye processy i nanosy. L.: Gidrometeoizdat. 1990. P. 259-266. (in Russ)

Chalov R.S. Fluvial science: theory and applications. Channel processes: drivers and conditions of river channel character and change. M.: Izd-vo LKI. 2008. 608 p. (in Russ)

Chalov R.S., Chalova E.R. Channel processes on the Yamal Peninsula rivers and their mapping // Vest. Udmurt. un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle. 2024. Vol. 34. № 3. P. 308-314. (in Russ)

Channel processes on the rivers of USSR. M. 1:4000000. M.: GUGK SSSR. 1990. 4 p. (in Russ)

Channel processes on the rivers of Altai Territory. M. 1:1000000. M.: GUGK SSSR. 1990. 1 p. (in Russ)

Ena V.G., Ena P.M. Transformation of the Crimea landscapes during the years of Soviet Union period // Natural and labor resources of Left-bank Ukraine and their use. Vol.10. M. 1971. P. 48-61. (in Russ)

Kiseleva G.A., Prokopov G.A. Determination of river sections with different degree of anthropogenic transformation (the case study of the Salgir River) // Sustainable Crimea. Water Resources. Simferopol': Tavrida. 2003. P. 135-141. (in Russ)

Lisovskij A.A., Novik V.A., Timchenko Z.V., Mustafaeva Z.R. Surface water bodies of the Crimea (reference book). Simferopol': Roskomvodhoz ARK. 2011. 114 p. (in Russ)

Oliferov A.N. Mudflow phenomena in the Crimea as environmental emergencies // Geopolitika i ekodinamika regionov. 2005. № 1. P. 39-46. (in Russ)

Oliferov A.N., Timchenko Z.V. Rivers and Lakes of Crimea. Simferopol': Dolya. 2005. 216 p. (in Russ)

Pavlov I.N. The Crimea rivers: channel types and their ecological assessment // Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya. 1994. № 3. P. 78-85. (in Russ)

Pavlov I.N. Comparative analysis of channel processes on rivers with different water content in mountainous-piedmont-alpine regions and their anthropogenic changes (case study of the Crimea and Altay rivers). Avtoref diss. ...uch. step. kand. geogr. nauk. M.: MGU. 1996. 29 p. (in Russ)

River channel morphology and channel changes in the European part of Russia and neighboring countries. M. 1:2000000. M.: Fed. Sluzhba geodezii i kartografii. 1999. 4 p. (in Russ)

Ruhlov N.V. Review of river valleys of the mountainous part of the Crimea. Petrograd. 1915. 491 p. (in Russ)

ABOUT THE AUTHORS

Chalova Ekaterina Romanovna. Engineer of the Aerospace Research Laboratory of Lomonosov Moscow State University, Candidate of geographical sciences, Moscow, ekar28@yandex.ru

Chalov Roman Sergeevich. Lomonosov Moscow State University. Doctor of geographical sciences, Professor. rschalov@mail.ru

УДК 551.4

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СРЕДНЕМ И НИЖНЕМ АМУРЕ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В МОРФОЛОГИИ РУСЛА И ПОЙМЫ

Р.С. Чалов[1]*, А.Н. Махинов[2], А.В. Чернов[1], В.В. Иванов[1]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

[2]*Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия*

**rschalov@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2024
После доработки 20.03.2025
Принята к публикации 10.04.2025

Аннотация. В статье рассматриваются особенности морфологии русла среднего и нижнего Амура, обусловленные вертикальными русловыми деформациями, характеризующимися различной направленностью и интенсивностью. На большей части среднего Амура (кроме участка пересечения хребта Малый Хинган, где русло врезанное, практически беспойменное) и всем нижнем Амуре развита направленная аккумуляция наносов, и лишь ниже слияния с р. Зеей – слабое врезание реки. Повышенный вынос наносов из притока после возведения на нем гидроузла и начавшегося размыва в низовьях песчаной Белой горы (в XX в.) обусловил смену врезания на первых нескольких десятках километров аккумуляцией, которая еще не проявляется в морфологии русла. Разная направленность вертикальных деформаций фиксируется в положениях кривых $Q = f(H)$, соответственных уровней, отражается в изменениях типа русла и рельефе днища долины. При направленной аккумуляции наносов для Амура в нижнем течении характерно превышение меженного уровня воды над поверхностью поймы, широкое распространение пойменной многорукавности, повсеместное формирование сложно разветвленного русла, а на притоках (кроме больших рек – Сунгари и Уссури) – приустьевых озер-разливов. Ниже г. Комсомольска-на-Амуре Амур пересекает отроги Сихотэ-Алиня, русло становится врезанным по геоморфологическому типу, но разветвленным, а на всех малых горных притоках перед впадением в Амур формируются приустьевые озера. В приустьевой части Амура чередование широкопойменных, адаптированных и врезанных участков русла происходит также на фоне направленной аккумуляции наносов, проявляющейся в русловых разветвлениях, пойменной многорукавности и приустьевых озерах на притоках. Таким образом, на протяжении почти всего среднего и нижнего Амура происходит систематическая аккумуляция наносов, связанная с отрицательными тектоническими движениями, прерываемая на среднем Амуре врезанием при пересечении им положительных структур. Длительная (в геологическом масштабе времени) интенсивная аккумуляция наносов определяет морфологию и динамику русла Амура даже на тех участках, где ее темпы снижены или она сменяется слабым врезанием.

Ключевые слова: Амур, русло, пойма, врезание реки, направленная аккумуляция наносов, приустьевые разливы на притоках

DOI: 10.71367/3034-4638-2025-2-2-18-32

ВВЕДЕНИЕ

Русловые деформации принято подразделять на три основные группы – вертикальные, горизонтальные и движение грядовых форм руслового рельефа (Маккавеев, Чалов, 1986). Вертикальные деформации, приводящие к трансформации продольного профиля рек, наиболее масштабны в отношении региональности проявления. По времени проявления они могут быть направленными и периодическими (знакопеременными). Первые носят, как правило, общий (региональный) характер и охватывают значительные по протяженности участки рек или реки в целом, вторые являются местными или локальными.

Причины возникновения вертикальных деформаций разнообразны – от глобальных (тектонические движения земной коры, изменения климата, колебания базиса эрозии, антропогенные преобразования природной среды) до частных (спрямление излучин, разработка русловых карьеров, проведение дноуглубительных работ). Вертикальные деформации, связанные с глобальными причинами, рассматриваются лишь в том случае, если они наблюдаются выше и ниже водохранилищ или при массовой разработке русловых карьеров, характеризуются большой интенсивностью и требуют прогноза и учета при любых формах хозяйственной деятельности на реках и в речных долинах. При естественном проявлении ими обычно можно пренебрегать, и поэтому их оценка дается часто лишь на обобщенном качественном уровне. Исключение составляют экстремальные случаи развития вертикальных деформаций, определяющих условия жизни людей на берегах рек, т. к. они вызывают поднятие русла выше окружающей территории при аккумуляции (Чалов и др., 2000) или врезание рек относительно поверхностей, освоенных человеком (Сидорчук, Чалов, 1996). Однако и при малой интенсивности с вертикальными деформациями (их направленностью) в конечном счете связано строение речных долин; в определенной мере они влияют на формирование русла того или иного морфодинамического типа, создают общий фон, на котором проявляются все другие процессы руслоформирования, а при многовековом направлении развития – условия освоения и хозяйственной деятельности (Махинов, 2006).

На Амуре вертикальные русловые деформации характеризуются различной направленностью, причем в среднем течении участки врезающегося русла чередуются с участками, где происходит аккумуляция наносов, тогда как для нижнего течения характерна на всем протяжении направленная аккумуляция наносов. При этом имеющиеся данные свидетельствуют о неоднократном чередовании в пределах межгорных впадин процессов углубления долин и последующего их заполнения аллювиальными отложениями. На участках пересечения горных массивов в основном происходит врезание русла в коренные породы, которое сохраняется и сейчас в пределах Малого Хингана. На нижнем Амуре в голоцене направленная аккумуляция охватила даже горные участки реки, приведя к образованию островных горных массивов по периферии низменностей, в первую очередь Среднеамурской. Это – своеобразные остатки гор, погребенных под мощной толщей озерно-аллювиальных отложений.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДОЛИНЫ АМУРА

В течение всего кайнозоя в долине нижнего и части среднего Амура преобладало накопление аллювиальных отложений (Ахметьева, 1977), компенсирующее прогибание земной коры. Неодинаковая направленность и интенсивность тектонических движений в пределах отдельных геологических структур предопределили особенности строения долины, историю формирования и направленность современных русловых процессов на различных ее участках. В современном рельефе долины Амура наиболее отчетливо сохранились следы долинного морфолитогенеза за последние 20–25 тысяч лет, что позволяет наметить основные этапы геоморфологического развития территории в конце четвертичного периода (Махинов, 1990; 2006).

Во время последнего оледенения и послеледниковья (27–12 тысяч лет назад) долина реки на большей части своей длины в среднем и нижнем течении заполнялась аллювиальными наносами. Темпы аккумуляции были наивысшими за всю историю долины Амура. В устьевых частях крупных притоков (Анюй, Гур, Уссури, Тунгуска и других) возникали обширные конусы выноса, пологонаклонные к долине Амура (Чернов, 2008). Формирование аккумулятивных толщ происходило не только в пределах равнин, но и захватило горные части долины Амура в Хинганском, Комсомольско-Киселевском и Чаятынском сужениях. Уровень максимальной аккумуляции соответствует высоте поверхности, на которой расположен г. Комсомольск-на-Амуре. Конусы выноса, приуроченные к этому уровню в виде небольших по площади наклонных равнин, известны в приустьевых частях многих притоков Амура в пределах горной части его долины. Небольшие фрагменты конусов выноса сохранились в долинах Сихотэ-Алиня, куда проникала регрессивная аккумуляция (Короткий, 1985).

Таким образом, к концу верхнечетвертичного времени сформировалась обширная аккумулятивная равнина, которая протягивается от Малого Хингана до устья, прерываясь местами на участках горных пережимов и расширяясь в пределах межгорных впадин. Значительные ее площади были заняты обширными мелководными озерами. Узкими прерывистыми полосами она протягивается вверх по долинам притоков.

В начале голоцена происходит врезание Амура в пределах всего нижнего течения на 15–20 м на всем его протяжении. В результате по обе стороны от современной поймы образовался четко выраженный уступ, расчлененный местами оврагами и долинами небольших рек (Махинов, 2006). Глубинная эро-

зия распространилась регрессивно по всем рекам бассейна Амура. Этим обусловлено своеобразное положение конусов выноса притоков, имеющих резкие уступы и явно реликтовый облик. Обширные припойменные озера подтопления, образовавшиеся в предшествующий этап направленной аккумуляции, были спущены, и их освободившиеся от воды днища стали заболачиваться.

Примерно 5–7 тыс. лет назад в долине нижнего течения Амура возобновляется накопление избыточного количества наносов в русле реки (направленная аккумуляция), а также на поверхности поймы при ее затоплении, в результате чего они стали подниматься относительно окружающей территории. К настоящему времени раннеголоценовый врез наполовину заполнен аллювиальными отложениями. Вновь стали формироваться припойменные озера подтопления как следствие аккумуляции на главной реке (Амуре), более активной, чем на притоках (в результате подпора от главной реки). Наиболее крупные озера подтопления имеют площадь более 100 кв. км (Болонь, Хумми, Кизи и другие). На отдельных участках Среднеамурской и Удыль-Кизинской низменностей при высоких летне-осенних паводках затапливаются даже прилегающие к пойме пониженные поверхности озерно-аллювиальной равнины, на которых формируется наложенная пойма.

На Земле современная направленная аккумуляция наносов в долинах рек распространена довольно ограниченно и в основном приурочена к нижним течениям крупнейших рек планеты – Амазонки, Янцзы, Оби, Енисея, Хуанхэ и некоторых других. В долине нижнего и частично среднего Амура и в низовьях ряда его притоков современная аккумуляция проявилась достаточно широко (Короткий, 1985; Махинов, 1990; 2006). Она отмечается на всем протяжении Амура ниже слияния с р. Сунгари и в низовьях рек Амгуни, Уссури, Анюя и других. При этом накопление аллювия происходит также в пределах горных участков долины нижнего Амура. К югу от Амура современная аккумуляция проявляется на реках, пересекающих обширную Великую Китайскую равнину, в том числе на Хуанхэ и Янцзы, где ее скорости достигают 9 см в год. Это дает основание говорить о Тихоокеанском поясе низменностей Евразии, в пределах которого все большие реки испытывают направленную аккумуляцию наносов (Чалов и др., 2006).

Исследование мощности и состава аллювиальных отложений позволяет сделать вывод о направленности вертикальных деформаций русла за длительный отрезок времени, исчисляющийся десятками тысяч лет (Карташов, 1972). На современном этапе определить направленность вертикальных деформаций русел равнинных рек и установить их интенсивность можно, применяя точные гидрологические методы, дополняя их комплексом морфологических признаков, выявляемых при изучении морфологии и динамики русла и строения поймы (Маккавеев, Чалов, 1963). Однако для среднего Амура, где аккумуляция местами сменяется врезанием реки, возможно использование только анализа кривых соответственных уровней. Другие методы (кривые связей расходов и уровней, баланса наносов) здесь неприменимы из-за отсутствия данных многолетних наблюдений.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СРЕДНЕМ АМУРЕ

Анализ кривых соответственных уровней и морфологических признаков показал, что в среднем течении Амура в его разных частях вертикальные деформации русла характеризуются не только различной направленностью, но и интенсивностью. Это находит отражение как в морфологии и динамике русла, так и в рельефе днища долины. Здесь выделяется пять участков, отличающихся по направленности и интенсивности вертикальных русловых деформаций.

Для *первого участка от устья р. Зеи до устья р. Буреи* морфологические признаки свидетельствуют о слабом врезании реки. На это указывают особенности днища долины и русла Амура: двусторонняя пойма, справа очень узкая, в некоторых местах выклинивающаяся, имеет ступенчатый поперечный профиль, на котором более древние ступени располагаются гипсометрически выше более молодых. Кровля русловой фации аллювия в разрезах поймы занимает высокое положение (отношение видимой мощности русловой фации аллювия к пойменной составляет 2/3), причем она лежит выше отметок прирусловых отмелей, побочней и осередков, высота которых над меженным уровнем реки превышает 2 м. Глубинной эрозией можно объяснить, по-видимому, преобладание относительно прямолинейного русла, лишь непосредственно ниже слияния Амура и Зеи осложненного односторонними разветвлениями.

Между г. Благовещенском (990 км по судовому ходу от г. Хабаровска) и с. Гродеково (970 км) за 30-летний период времени (1955–1985 гг.) кривая соответственных уровней поднялась на 70–80 см, отражая повышение отметок дна вследствие аккумуляции наносов (рис. 1,А). Это не соответствует морфологическим признакам на данном отрезке реки и направленности процесса (врезания) ниже

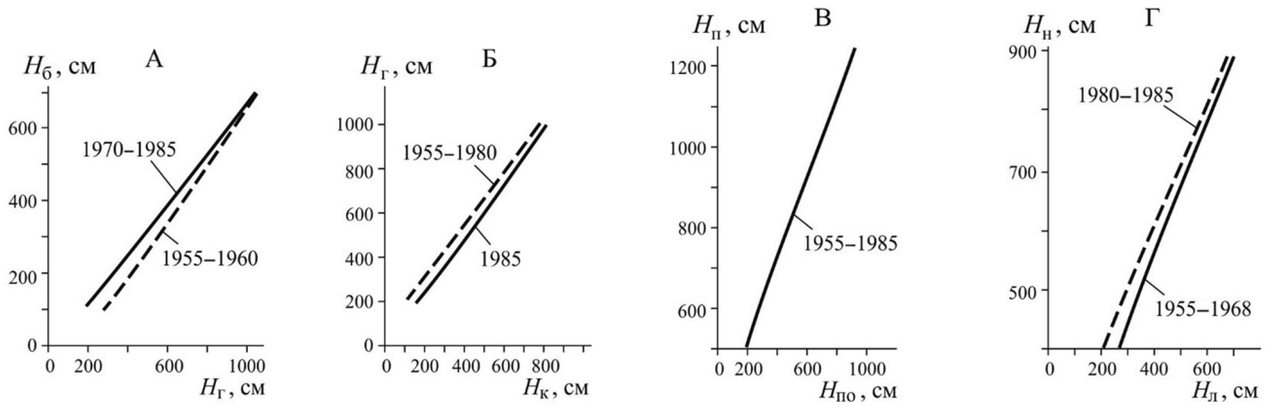


Рис. 1. Графики связей соответственных уровней для смежных гидрологических постов среднего Амура за разные периоды времени: А – г. Благовещенск ($H_б$) и с. Гродеково ($H_г$); Б – с. Гродеково ($H_г$) и с. Константиновка ($H_к$); В – с. Пашково ($H_п$) и с. Помпеевка ($H_{по}$); Г – п. Ленинское ($H_л$) и с. Нагибово ($H_н$) (Иванов, Махинов и др., 2000)

Fig. 1. Graphs of the relations of the corresponding levels for adjacent hydrological posts of the Middle Amur for different periods of time: A – Blagoveshchensk ($H_б$) and the village of Grodekovo ($H_г$); Б – the village of Grodekovo ($H_г$) and the village of Konstantinovka ($H_к$); В – the village of Pashkovo ($H_п$) and the village of Pompeevka ($H_{по}$); Г – the village Leninskoe ($H_л$) and the village Nagibovo ($H_н$) (Ivanov, Makhinov et al., 2000)

по течению (Гродеково–Константиновка, рис. 1,Б). Очевидно, здесь сказывается влияние выносов наносов из р. Зеи, на которой в этот период был сооружен Зейский гидроузел. Глубинная эрозия в нижнем бьефе ГЭС привела к увеличению стока донных (влекомых) наносов, создавших волну аккумуляции на Амуре непосредственно ниже его слияния с Зеей. Еще одним фактом, подтверждающим временный характер аккумуляции наносов на данном коротком отрезке (17 км), является то, что именно в этот период времени здесь сформировались односторонние разветвления. До сооружения на р. Зее гидроузла русло было прямолинейным, неразветвленным, как и на смежных участках выше и ниже по течению.

На данном участке (от устья р. Зеи до с. Константиновки) о слабом врезании реки свидетельствует направленное понижение уровней воды на г.п. Константиновка (890 км), составившее за 30-летний период 60 см. Однако, с учетом повышения уровней в верхней части участка (г.п. Гродеково), фактическое понижение уровней составило всего 10–20 см.

От с. Константиновки до с. Пашково (второй участок) в русле Амура происходит направленная аккумуляция наносов, которая отчетливо проявляется в морфологии долины и русла Амура. Высота поймы снижается до 3–4 м над меженным уровнем; меняется рельеф ее поверхности – она является одноярусной, прирусловая часть поймы заметно выше тыловой. В устьях притоков формируются озера подтопления – приустьевые разливы (реки Урил, Улагахэ, Ганукан и др.). Значительно усложняется морфология русла: оно становится разветвленным с преобладанием сложных форм многорукавности. В первую очередь это относится к участку между с. Константиновкой и с. Куприяново. Ниже, вплоть до с. Пашково, разветвленность русла меньше. Здесь же отмечено увеличение интенсивности горизонтальных русловых деформаций, русло становится менее устойчивым: максимальных величин достигают длина размываемых берегов, протяженность фронта их размыва и берегозащитных сооружений (в основном по правому китайскому берегу), а также перераспределение стока между рукавами, направляющегося в те из них, в которых происходит размыв берегов, или в те, что находятся под направляющим воздействием берегозащитных сооружений (рис. 2).

Такие изменения форм проявления горизонтальных деформаций русла Амура по направлению к Малому Хингану, по-видимому, отражают снижение темпов аккумуляции наносов в этом направлении. Прямая связь между направленностью вертикальных и формой проявления горизонтальных русловых деформаций отсутствует (Маккавеев, 1955; Маккавеев и др., 1961), но во временном аспекте она проявляется, особенно в разветвленном русле. Поскольку между водностью потока и его транспортирующей способностью существует квадратичная зависимость, на врезающейся реке

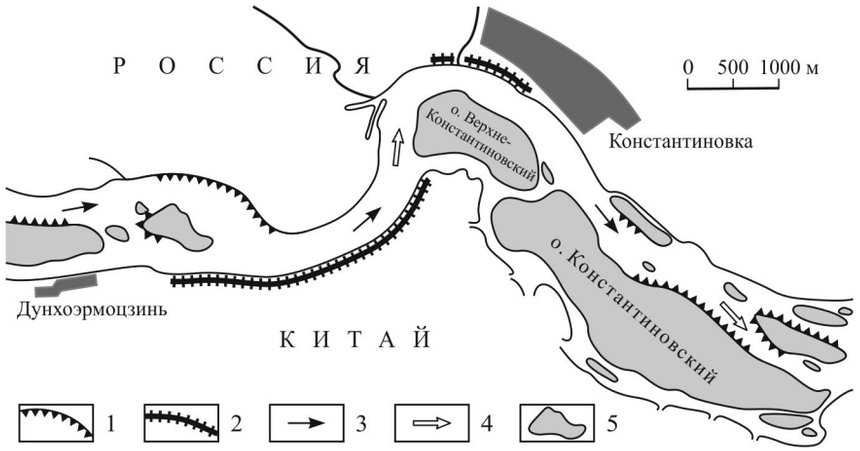


Рис. 2. Интенсивные горизонтальные деформации в русле р. Амур в районе с. Константиновка. 1 — интенсивный размыв берегов; 2 — берегоукрепительные сооружения; 3 — направление течения; 4 — перераспределение стока; 5 — молодые пойменные острова

Fig. 2. Intense horizontal deformations in the Amur riverbed near the village of Konstantinovka. 1 — intensive coastal erosion, 2 — coastal protection structures, 3 — current direction, 4 — redistribution of runoff, 5 — young floodplain islands

происходит в первую очередь углубление многоводных рукавов, пропускная способность которых увеличивается, тогда как маловодные мелеют и со временем отмирают.

Тенденция отмирания рукавов разветвленного русла является признаком врезания реки; наоборот, аккумуляция наносов всегда сопровождается увеличением разветвленности русла. В последнем случае различия темпов аккумуляции сказываются на степени разветвленности русла, тогда как интенсивность процесса — независимая характеристика.

Изменения направленности и интенсивности вертикальных деформаций русла среднего Амура отражаются в уклонах водной поверхности: на участках врезания реки уклоны выше, чем на участках аккумуляции наносов (табл. 1), что свидетельствует о невыработанности на данном временном этапе продольного профиля реки.

Таблица 1. Уклоны и среднегодовые расходы воды на участках среднего Амура с разной направленностью вертикальных деформаций

Table 1. Slopes and average annual water consumption in areas of the Middle Amur River with different directions of vertical deformations

№ п/п	Участок	Протяженность, км	Уклон, ‰	Среднегодовой расход воды, м³/с
1	Устье Зеи — устье Буреи	269	0.095	3520
2	Устье Буреи — вход в Хинган (с. Пашково)	136	0.085	4750
2а	Предхинганский участок (с. Иннокентьевка — с. Пашково)	108	0.092	4750
3	Вход в Хинган — выход из Хингана	164	0.142	4750
3а	Малый Хинган (с. Пашково — с. Помпеевка)	81	0.099	4750
3б	Помпеевский хр. (с. Помпеевка — с. Екатерино-Никольское)	83	0.185	4750
4	Выход из Хингана — устье р. Сунгари	146	0.071	4750
5	Устье р. Сунгари — г. Хабаровск	270	0.062	7450

Разнонаправленность вертикальных русловых деформаций и их различная интенсивность в пределах Зейско-Буреинской равнины обусловлены рядом факторов, ведущий из которых – современные тектонические движения. Долина Амура заложена здесь по границе двух тектонических структур – Зейско-Буреинской палеомезозойской плиты, охватывающей левую часть бассейна, и Малого Хингана – палеозойского орогена, лежащего юго-восточнее (Сорокин и др., 2010).

Согласно «Карте новейшей тектоники...» (1985), обе структуры за неотектонический период испытали устойчивое воздымание, однако оно резко дифференцировано: при суммарном поднятии орогена на 200–600 м прилегающая к нему часть плиты поднялась всего на 50–150 м, т. е. испытала относительное погружение. В неоген-четвертичное время здесь сформировался Предхинганский краевой прогиб, который пересекается долиной Амура.

Снижение темпов поднятия Предхинганского краевого прогиба по длине объясняет смену вниз по течению врезания реки аккумуляцией наносов (до влияния на эти процессы Зейского гидроузла). На этом участке, по сравнению с прилегающими, отмечается относительное уменьшение уклонов и, следовательно, транспортирующей способности потока, что в конечном итоге приводит к аккумуляции поступающих сверху наносов и повышению отметок дна русла и профиля водной поверхности.

Аккумуляция наносов в русле непосредственно перед Хинганом, по сравнению с вышележащим участком, менее интенсивна. Она связана с подпорными условиями, обусловленными переходом от свободных к ограниченным условиям развития русловых деформаций. Широкопойменное русло сменяется врезанным (пойма выклинивается) и сужается более чем в 1.5 раза. Подпорные условия проявляются во время прохождения руслоформирующих расходов воды, когда затоплена пойма (Белый, Чалов, 1997). В межень, наоборот, перед «входом» в Хинганское ущелье отмечается увеличение уклонов (табл. 1, участок 2а). В теоретическом плане подобная «игра уклонов» при переходе от широкопойменной долины к ее сужению как своеобразное гидравлическое явление была детально описана Н.И. Маккавеевым (Маккавеев, 1955).

Для предхинганского отрезка русла кривая соответственных уровней неизменна за многолетний период. По-видимому, это объясняется тем, что, пересекая горный массив, река врезается, и понижение здесь уровней компенсируется их повышением выше по течению вследствие аккумуляции.

В пределах Малого Хингана русло Амура в целом врезанное, однако неоднородность горной системы и довольно сложное ее строение обусловливают более сложное распространение по длине реки направленных вертикальных деформаций. Малый Хинган образован двумя низкогорными хребтами – собственно Малым Хинганским (в геоморфологической литературе его иногда называют Главным) и Помпеевским, между которыми располагаются Стариковское плато и Сутарская впадина (Геоморфология Амуро-Зейской равнины..., 1973). Эти морфоструктуры отличаются неодинаковой скоростью их неотектонического воздымания и литологией слагающих их горных пород, что отражается в ступенчатой форме продольного профиля Амура. Собственно Малый Хинганский хребет сложен в основном эффузивами мелового возраста, в пределах Стариковского плато преобладают метаморфические породы, представленные гнейсами, сланцами, кристаллическими кварцитами, отличающимися более высокой противоэрозионной устойчивостью.

Помпеевский хребет сложен интрузивными породами (гранитоидами), для которых характерна наибольшая противоэрозионная устойчивость. В результате *на участке «Хинганских ворот» (третий участок среднего течения Амура)* в продольном профиле прослеживается перегиб, приуроченный к пересечению рекой Помпеевского интрузивного массива (см. табл. 1). При среднем значении уклона для всего Хинганского участка 0.142‰ в верхней части участка (пересечение рекой хребта Малый Хинган) он составляет 0.099‰, тогда как на участке Помпеевского хребта он увеличивается почти вдвое (0.187‰).

На всем протяжении Хинганского сужения Амур имеет врезанное русло. Однако ряд косвенных признаков указывают на то, что в верхней и центральной частях участка (до устья р. Зимовейной), где река пересекает Сутарскую впадину, в настоящее время происходит местная аккумуляция наносов. На это указывают наличие односторонней поймы по краю шпор врезанных излучин и вдоль прямолинейных отрезков русла, образование приустьевых озер на притоках Амура (в устьях р. Улагахэ и др.). При этом большая часть объема отложений формируется в результате действия гравитационных процессов. В аккумуляции наносов в русле главная роль принадлежит крупногалечному материалу, основным поставщиком которого являются коренные склоны долины с осыпями, спускающимися непосредственно к руслу реки.

В нижней части Хинганского участка при максимальных значениях уклонов русло реки врезанное, слабоизвилистое, беспойменное. Рост скоростей течения вследствие двукратного увеличения укло-

нов обусловливает практически полный вынос за пределы участка поступающих сюда наносов и литогенного материала со склонов. Вследствие этого русло здесь либо скальное, либо выстилается крупногалечной отмосткой, размеры частиц которой превышают критические для сдвига их потоком. Это подтверждается данными эхолотирования русла, выявившего отсутствие грядового рельефа дна и преобладание по оси русла скального ложа.

Подобные условия должны обеспечивать интенсивное врезание реки. Однако кривые соответственных уровней для постов на этом участке имеют постоянные координаты за весь период наблюдений (рис. 1,В). Последнее может быть обусловлено как большими уклонами и высокой транспортирующей способностью потока, препятствующего аккумуляции наносов, так и высокой прочностью слагающих ложе коренных интрузивных пород, ограничивающих глубинную эрозию. Постоянное положение кривых объясняется еще и тем, что темпы поднятия горного массива и темпы врезания реки в данном случае не совпадают. В результате Помпеевский участок с многочисленными выходами коренных пород на дне по всей его длине, включая Союзненский «перекат», создает своеобразную структурную макроформу в продольном профиле Амура в виде своеобразного «водослива с широким порогом».

Ниже Хинганского сужения на *четвертом участке* (табл. 1) сначала на протяжении 40–50 км преобладает глубинная эрозия, характеризующаяся небольшими темпами, сменяющаяся вниз по течению направленной аккумуляцией. Врезанию реки способствуют формирование в многоводную фазу режима кривой спада уровней при выходе реки из ущелья в долину с широкой поймой и смена врезанного русла широкопойменным. О преобладании врезания реки свидетельствует ступенчатая пойма. В морфологическом отношении следствием глубинной эрозии являются относительно прямолинейное русло и очень малое количество разветвлений.

На *нижнем (пятом) 360-километровом участке (до г. Хабаровска)*, находящемся уже в пределах Среднеамурской низменности, происходит направленная аккумуляция наносов на реке. Переход от врезания потока к аккумуляции наносов зафиксирован в «ножницах» пойменных ступеней и надпойменной поверхности, представленной озерно-аллювиальной равниной: происходит слияние ступеней в единую одноярусную полигенетическую пойму; снижение отметок равнины приводит к тому, что она оказывается ниже уровня воды 1%-ной обеспеченности. Косвенными признаками аккумуляции наносов на Амуре являются: широкое распространение пойменной многорукавности; развитие спрямляющих рукавов у сегментных излучин; смещение устьев крупных притоков (Биджана, Уссури) вниз по течению по отношению к их выходу в пределы поймы Амура.

В результате аккумуляции наносов днище долины постоянно повышается, а область разливов реки частично захватывает озерно-аллювиальную равнину. Центральные и тыловые части поймы лежат гипсометрически ниже минимального уровня воды в реке, отделяясь от нее возвышенной прирусловой поймой. Особенно интенсивна аккумуляция ниже устья р. Сунгари. Хотя после слияния с Сунгари водоносность Амура возрастает, но в то же время на этом участке наблюдается резкое увеличение стока наносов (мутность потока, по данным наблюдений, возрастает в 20 раз, увеличиваясь в высокую межень от 20 мг/л выше устья Сунгари до более чем 400 мг/л ниже его). Наносы аккумулируются здесь из-за того, что транспортирующая способность потока оказывается недостаточной для перемещения всего поступающего материала. Об аккумуляции наносов свидетельствует наличие многочисленных приустьевых озер на притоках (реки Бира, Вертопрашиха, Нунцзян и др.).

Выше слияния с р. Сунгари аккумуляция на Амуре усиливается подпором со стороны притока, а ниже – выносами из него большого количества наносов. В результате здесь резко увеличивается количество песчаных осередков, отмелей и кос, небольших по площади островов, образующих в основных рукавах вторичные разбросанные разветвления.

В то же время анализ данных по гидрологическим постам, расположенным между выходом реки из горного ущелья Малого Хингана и г. Хабаровском, показывает более сложную картину. На участке от с. Екатерино-Никольского до с. Нагибово изменение соответственных уровней указывает на повышение уровня за период с 1955 по 1985 г. на 20 см как следствие аккумуляции наносов на г.п. Нагибово. Ниже, на участке с. Нагибово – п. Ленинское, изменение положения уровней во времени имеет иной характер (рис. 1,Г): с 1955 по 1980 г. наблюдалось стабильное положение кривой соответственных уровней; к 1985 г. уровни понизились на 40 см.

На участке п. Ленинское – г. Хабаровск отмечается постоянная тенденция к снижению уровня с 1955 по 1985 г., которое составило за это время около 60 см. Анализ связи уровней и расходов воды по г.п. Хабаровск за период с 1945 по 1985 г. также показал снижение уровней воды почти на 80 см (Ким, Махинов, 1997).

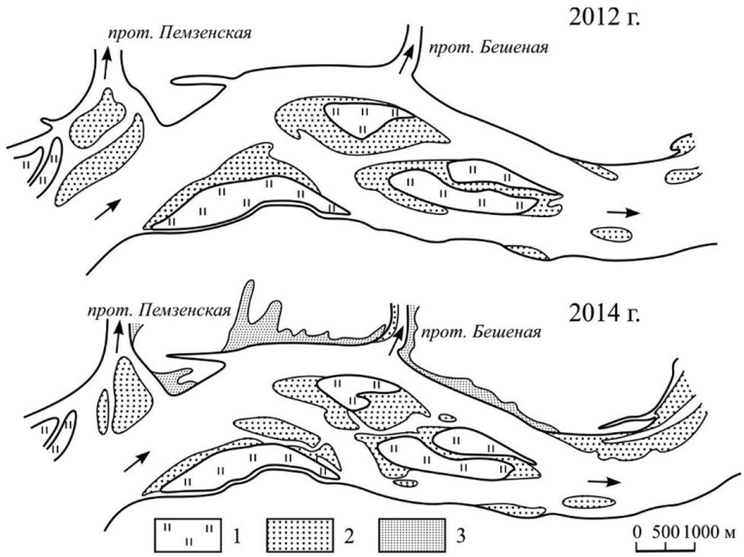


Рис. 3. Изменение русла р. Амур после наводнения 2013 г. на участке выше г. Хабаровска. 1 — пойменные острова; 2 — песчаные косы и осередки; 3 — шлейфы песчаных отложений, образовавшиеся при выходе воды на пойму

Fig. 3. Changes in the Amur riverbed after the 2013 flood in the area above Khabarovsk. 1 — floodplain islands, 2 — sand spits and sediments, 3 — plumes of sand deposits formed when water enters the floodplain

Возможно также, что на направленность вертикальных деформаций повлияла смена циклов водности, сопровождающаяся преобладанием бесподпорных условий при слиянии Амура с Сунгари и с Уссури. Последние носят циклический характер и проявляются в смене направленности процесса в маловодные и многоводные периоды. Во время крупных наводнений на Амуре в последний период высокой водности (2013, 2019–2021 гг.) в русле перемещаются огромные массы наносов, активизируя перераспределение стока воды между рукавами и соответственно горизонтальные деформации русла (Махинов и др., 2016). Скорость размыва берегов достигала 15 м, а толща отложений на песчаных шлейфах поймы местами превышает 1.0 м (рис. 3).

Разнонаправленные изменения в положениях кривых соответствующих уровней во многом связаны с активной техногенной нагрузкой на реку в пределах всей нижней части среднего Амура. Именно здесь до начала 1990-х гг. выполнялся наибольший объем дноуглубительных работ по трассе судового хода и, главное, разрабатывались крупные русловые карьеры стройматериалов (особенно в районе г. Хабаровска), обеспечивающие безвозвратную выемку грунта, часто превышающую сток руслообразующих наносов. Здесь же произошло развитие спрямляющих излучины рукавов (Махинов и др., 2011), что сопровождается местным врезанием и соответствующим снижением уровней воды, т. е. проявлением местных вертикальных русловых деформаций.

Антропогенный фактор и природные явления, накладываясь друг на друга, создают сложную картину изменений отметок уровней воды в реке на различных ее участках и во времени.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА НИЖНЕГО АМУРА

Наиболее сложные строение и динамика русла и поймы в нижнем течении Амура характерны для Среднеамурской низменности, центральная часть которой сложена разновозрастными аллювиальными отложениями; в период максимальной аккумуляции здесь располагались обширные озера, выраженные в настоящее время в рельефе обширными заболоченными понижениями. Их аналогами в настоящее время являются формирующиеся при впадении притоков приустьевые озера — разливы, занимающие значительные части тыловой поймы и прилегающие пониженные участки низменности.

Интенсивная аккумуляция в современном русле нижнего Амура как проявление его направленных вертикальных деформаций подтверждается анализом изменений по длине реки стока наносов и кривых связей расходов воды и уровней. Сток наносов на Амуре сравнительно невелик. В Амурский лиман река ежегодно вносит 14.9 млн т твердого вещества. Эта величина меньше годового стока наносов в районе г. Хабаровска, где он составляет 26.1 млн т. Вниз по течению, к г. Комсомольску-на-Амуре, он убывает на 20%, составляя здесь 19.0 млн т и отражая интенсивную аккумуляцию наносов в пределах Среднеамурской низменности. Пересекая во врезанном русле отроги Сихотэ-Алиня и принимая многочисленные горные притоки, Амур увеличивает сток наносов (до 19.5 млн т у г.п. Богородское), но затем он снова уменьшается как вследствие компенсационного накопления наносов в пределах погружающейся Удыль-Кизинской низменности, так и благодаря подпорным явлениям из-за влияния приливов (табл. 2).

Таблица 2. Сток наносов р. Амур по данным наблюдений на постах Гидрометеослужбы

Table 2. Sediment runoff of the Amur River according to observations at the posts of the Hydrometeorological Service

№ п/п	Река – пункт	Площадь бассейна, тыс. км^2	Период наблюдений, лет	Сток наносов, тыс. т
1	Амур – Хабаровск	1630	31	24 000
2	Амур – Комсомольск-на-Амуре	1730	23	19 000
3	Амур – Богородское	1790	16	19 500
4	Амур – устье	1855	оценка	14 900

Кривые расходов воды $Q = f(H)$ показывают, что за период наблюдений на гидрологических постах (в среднем около 50 лет) на вышележащем участке реки и его притоках имеет место устойчивая связь расходов воды Q и уровней H (рис. 4,А); и наоборот, в створе г. Комсомольска-на-Амуре прослеживается отчетливая тенденция повышения уровней при равнообеспеченных расходах воды (рис. 4,В), на фоне которой проявляются временные отклонения, связанные, очевидно, с перемещением крупных песчаных гряд. Тенденция повышения уровней характерна и для самого нижнего г.п. Богородское (рис. 4,Г), расположенного в начале сужения долины в нижнем конце Удыль-Кизинской низменности.

Промежуточное положение занимает г.п. Хабаровск (рис. 4,Б): здесь благодаря слиянию с р. Уссури, имеющей очень малый сток наносов (всего 0.4 млн т), а также карьерным разработкам в русле и дноуглубительным работам (по трассе судового хода) преобладает понижение уровней: при расходе

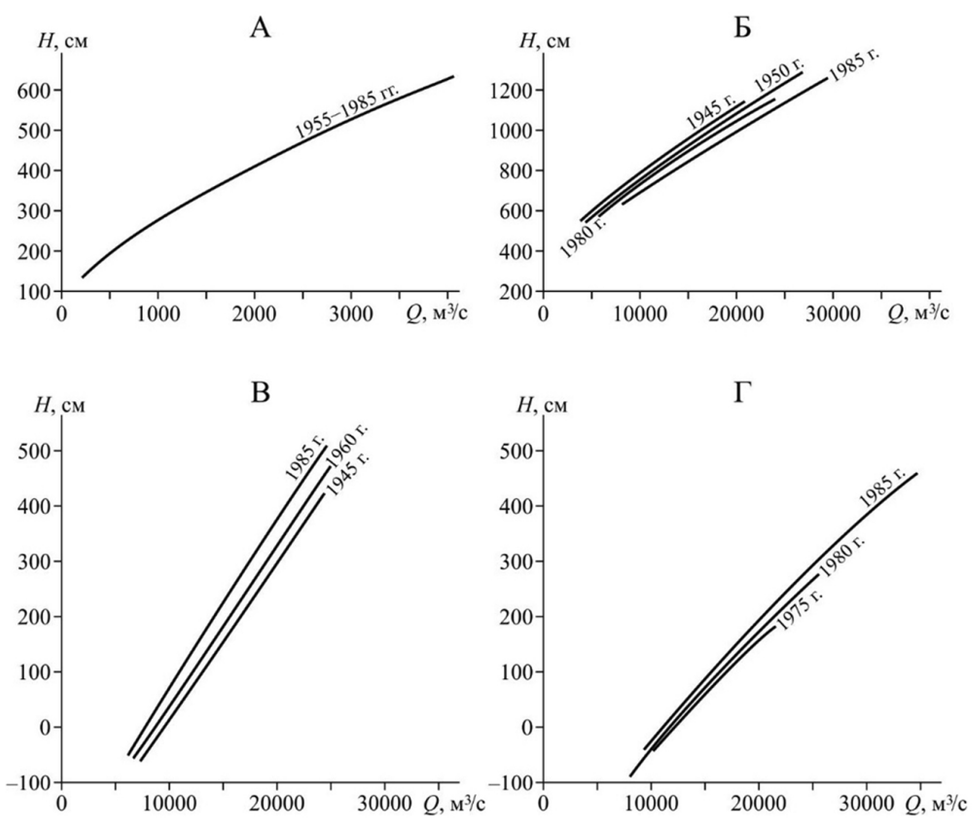


Рис. 4. Кривые $Q = f(H)$ для гидропостов на Шилке – Часовая (А), и на Амуре – Хабаровск (Б), Комсомольск-на-Амуре (В) и Богородское (Г)

Fig. 4. Curves $Q = f(H)$ for the hydraulic posts on Shilka – Chasovaya (A), and on Amur – Khabarovsk (Б), Komsomolsk-on-Amur (B) and Bogorodskoye (Г)

воды, соответствующем среднегодовому, – почти на 80 см за период с 1945 по 1985 г.

Средний объем ежегодного накопления отложений в днище долины (русло и пойма) нижнего Амура оценивается величиной около 6 млн т, что соответствует средней скорости аккумуляции 0.56–1.2 мм/год, в результате чего их поверхность повышается относительно окружающей территории, оказывая существенное влияние на формирование русла и поймы (Махинов, 2006). Морфологические проявления подобных процессов в условиях направленной аккумуляции наносов впервые были рассмотрены ранее (Маккавеев, Чалов, 1963). Последствиями положительных вертикальных деформаций русла на нижнем Амуре являются: формирование мощной пойменной фации аллювия, подошва которой лежит ниже среднемноголетнего уровня воды в реке; образование приустьевых озер (озер подтопления) практически на всех притоках Амура, начиная от устья р. Сунгари, в том числе на участках врезанного русла, т. е. в устьях горных рек, отделенных от русла главной реки прирусловыми валами (исключение составляют только устья Уссури и Сунгари – больших рек, собственная аккумуляция наносов которых сопоставима с накоплением наносов на Амуре); относительно более низкое положение тыловой части поймы по сравнению с уровнем воды в реке, вследствие чего при выходе притоков в долину Амура их воды ее затопляют, образуя озерные разливы сложной формы в плане. Наиболее крупные озера в низовьях притоков Амура совмещают в себе приустьевые разливы и озера, образовавшиеся вследствие подтопления тыловых частей амурской поймы.

В условиях направленной аккумуляции наносов русловые деформации и формирование поймы приобретают специфические черты. Современная пойма Амура представляет собой чередование широких (до 30 км) и суженных (не более 10 км) участков протяженностью 40–50 км. Наиболее древние массивы поймы, расположенные по ее периферии (в тыловой части), характеризуются плоскими западинами, занятыми озерами округлой формы, и общим слабым наклоном поверхности от русла в сторону тыловой части, причем отметки поймы здесь могут быть ниже отметок русла в межень. В этом же направлении увеличивается заозеренность поймы. Пойменная фация аллювия имеет мощность до 8 м.

Более молодые пойменные массивы характеризуются широким распространением в их пределах высоких песчаных валов (рёлок), имеющих эоловое происхождение (Махинов, 1990). Между рёлками располагаются выположенные широкие гряды, плоские поверхности и изогнутые в плане понижения, большинство из которых частично заполнены водой. Обычно к центру пойменного массива количество озер увеличивается. Мощность отложений пойменной фации составляет 4–5 м.

Самые молодые пойменные образования на Среднеамурской низменности представлены островами или фрагментами по краям более древних пойменных массивов. Наиболее высокими в их пределах являются прирусловые валы, активно формирующиеся во время затопления поймы. Высота валов над поверхностью основной поймы – до 2–3 м. Пойменные отложения представлены суглинком мощностью до 1.5 м. Толщина слоя наилка за один средний по размерам паводок в прирусловой части поймы колеблется от 1 до 3 см, уменьшаясь к центру пойменного массива до 0.05–0.1 см. Исключительно большую роль в интенсивном пойменном осадконакоплении играет густая и высокая травянистая растительность.

Одним из наиболее ярких проявлений направленной аккумуляции наносов на нижнем Амуре является формирование приустьевых (подпрудных) озер-разливов (рис. 5,А), образующихся на притоках вследствие усиленной аккумуляции наносов на главной реке – Амуре, вызвавшей повышение отметок русла и соответственно подпор воды в нижнем течении притоков (Махинов и др., 2011). Однако наиболее крупные озера в низовьях притоков Амура имеют разное происхождение. Одни возникли в результате затопления тектонически обусловленных пониженных участков земной поверхности, расположенных близко к долине Амура (Болонь, Кизи, Удыль), другие образовались вследствие затопления тыловых частей амурской поймы при более интенсивной аккумуляции в прирусловой ее части (Хумми, Джалунское и др.).

Приустьевые озера образовались в устьях притоков вследствие усиленной аккумуляции наносов в долине Амура, вызвавшей повышение поверхности русла и соответственно подпор воды в нижнем течении притоков (Махинов, 1992). Впадающие в озера пойменные протоки Амура (иногда 4–5) образуют дельты, которые соединяются друг с другом, оставляя между собой на месте акватории водоема небольшие озера причудливой формы. Со временем на месте приустьевого озера образуется своеобразный озерно-дельтовый пойменный массив, характеризующийся плоской поверхностью.

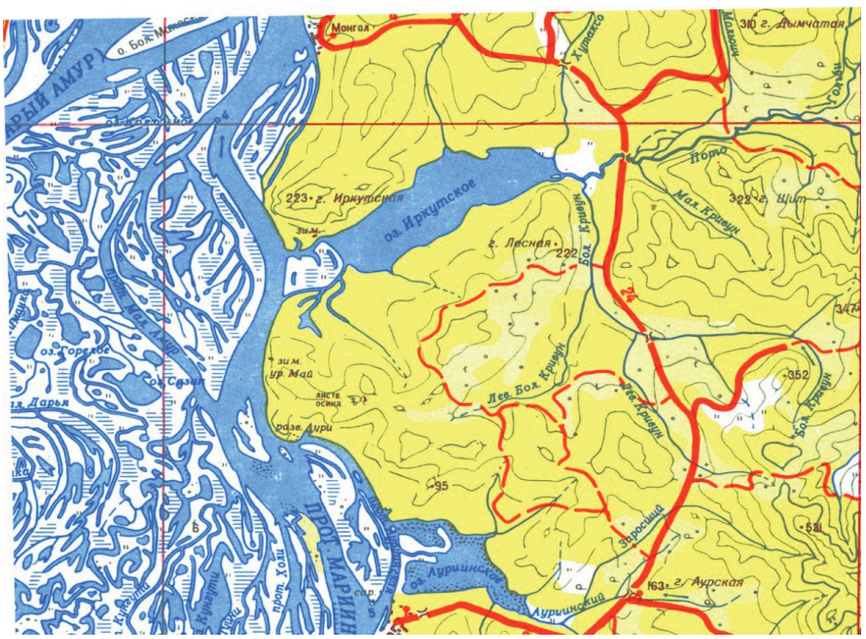
По мере роста площади озерно-дельтовой поймы и продолжающейся аккумуляции наносов в долине Амура приустьевые озера постепенно вытесняются вверх по долинам притоков или прижимаются к низкогорным выступам бортов долины в ее пределы, преобразуясь иногда в озеровидные

расширения. Отдельные озера (Хумми, Гасси и др.) за время своего существования сместились на 7–10 км. Наибольшие размеры имеет оз. Болонь в устье одноименного притока, отделенное от Амура поймой шириной около 9 км.

Минуя Среднеамурскую низменность, Амур на протяжении 150 км пересекает низкогорные сооружения, образованные отрогами Сихотэ-Алиня (с правого берега) и Мяо-Чана (с левого берега). Долина реки сужается до 5–8 км, местами (у с. Киселевки) до 7 км, русло шириной от 1.5 до 3.0 км становится врезанным. Склоны долины высотой 50–200 м сложены палеозойскими осадочными толщами, устойчивыми к размыву.

Накопление наносов в горной части долины Амура также приводит к образованию подпрудных озер в устьях притоков. Но здесь, в горном сужении долины, они имеют небольшие размеры (до 0.2 × 0.4 км) и вытянуты вдоль долин притоков (рис. 5,Б). Пойма представлена узкими островами и небольшими фрагментами береговой поймы, отделенными от склонов долины пойменными протоками. Несмотря на небольшие размеры пойменных массивов, в их пределах наблюдается несколько высотных уровней, образование которых обусловлено не врезанием реки, а молодостью пойменных фрагментов, не достигших в своем развитии среднего уровня, который имеет значительную высоту в условиях больших колебаний отметок воды в горной части долины (до 8–10 м).

Между устьем р. Шелехова и о. Ургуту на протяжении 36 км долина Амура пересекает локальное



А

Б

Рис. 5. Подпрудные озера – приустьевые разливы на притоках Амура в пределах Среднеамурской низменности (А) и во врезанном русле при пересечении отрогов Сихотэ-Алиня (Б)

тектоническое поднятие. В устьях притоков отсутствуют озера. Пойма имеет несколько уровней, наиболее высокий из которых расположен выше предельного для данного участка реки, что отражается в залегании русловой фации гипсометрически выше, чем на пойме предельного высотного уровня. Растительность представлена в основном более ксерофильными видами трав и редким лесом, что для поймы нижнего Амура вообще не характерно. Все это свидетельствует о врезании русла на данном локальном участке; следствием его, по-видимому, является увеличение стока наносов между гидропостами Комсомольск-на-Амуре и Богородское.

Выйдя из гор, Амур течет вдоль восточного края Удыль-Кизинской низменности, испытавшей в общих чертах то же развитие, что и Среднеамурская низменность. Отличие заключается в относительно большей роли озер, которые здесь являются как современными, приустьевыми, имеющими очень большие размеры, так и реликтовыми, разного размера – до 10 км^2, не соединенными с Амуром протоками (Круглое, Пальмука и др.). В геологическом строении восточного обрамления низменности большую роль играют вулканические покровы, представленные базальтами миоценового возраста. Амур местами подмывает их, образуя невысокие (до 20 м) скалистые обрывы (окрестности сел Софийского, Мариинского и др.).

Пойма Амура характеризуется чередованием узких и широких участков при наибольшей ширине 20 км. Она преимущественно представлена пойменно-островными массивами разных размеров, причем основной фон образуют очень большие массивы сложной формы, разделенные пойменными протоками, образующими пойменную многорукавность. Один из таких островных массивов, ограниченный примерно равными по водности рукавами раздвоенного русла – Старым и Новым Амуром, имеет длину 60 км при ширине 12 км. Центральные части таких массивов (межрукавьев) обычно заняты мелкими озерами подтопления. Рёлки (древние эоловые дюны) на пойме встречаются редко, будучи погребенными под толщей пойменных отложений вследствие интенсивной аккумуляции наносов. Пойменная фация, за исключением молодых пойменных островов, как правило, имеет мощность 10–12 м и представлена плотными суглинками с редкими прослоями супеси и линзами погребенных торфяников.

Предельный уровень поймы находится ниже относительно характерных отметок воды по сравнению с поймой Среднеамурской низменности. Поэтому она затапливается чаще и на более продолжительное время.

Между Удыль-Кизинской и Амуро-Амгуньской низменностями Амур пересекает низкогорный Чаятынский хребет. Крутые склоны долины, покрытые местами каменистыми осыпями, опираются на узкие (40–50 м) бичевники, перекрытые слоем валунного материала. Ширина русла, занимающего все дно долины, не превышает 1.5 км. Тем не менее в устьях притоков имеются небольшие озера, отделенные от русла Амура высокими галечно-песчаными валами.

В пределах Амуро-Амгуньской низменности русло Амура формируется под влиянием приливов, представляя собой уже его устьевую область. Пойма имеет плоскую поверхность и небольшую высоту над меженным уровнем воды. Вследствие поступления в низовья реки небольшого количества наносов преимущественно тонкого механического состава русло относительно устойчивое, о чем свидетельствуют незначительные изменения планового положения основного русла и рукавов реки за более чем столетний период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направленность вертикальных русловых деформаций в среднем течении Амура изменяется по длине реки в основном в связи с особенностями тектонических движений, проявляющихся по-разному на различных участках его долины. Они определяют долговременные тенденции вертикальных русловых деформаций, продолжительность которых измеряется сотнями и тысячами лет. Вместе с тем относительно кратковременные (десятки лет) процессы врезания или аккумуляции наносов в русле реки нередко бывают обусловлены хозяйственной деятельностью.

Систематическая аккумуляция на нижнем Амуре доказывается балансом наносов по длине реки, анализом кривых $Q = f(H)$ и рядом морфологических признаков (приустьевые озера на притоках, превышение уровня воды в межень над тыловыми частями поймы и т. д.). В этих условиях практически повсеместно (за исключением наиболее суженных участков врезанного русла и непосредственно ниже слияния с р. Уссури) формируются различные типы разветвлений с преобладанием сложных форм. Специфической их разновидностью является раздвоенное русло, на участках которого основные рукава на всем их протяжении характеризуются руслами своего морфодинамического типа, главным образом, одиночными, сопряженными и пойменно-русловыми разветвлениями. Направленная аккумуляция наносов способствует также развитию пойменной многорукавности, встречающейся даже на участках врезанного русла с узкой поймой.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выполнено по планам НИР (ГЗ) Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева и кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова, планам НИР ИВЭП ДВО РАН (исходные материалы).

Русловой анализ р. Амур выполнен при финансовой поддержке РНФ (проект 23-1700065).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахметьева Н.П. Палеогеография Нижнего Приамурья. М.: Наука. 1977. 112 с.

Белый Б.В., Чалов Р.С. Руслоформирующие расходы воды и морфологические типы русел на реках Дальнего Востока // Геоморфология. 1997, № 1. С. 58–65.

Геоморфология Амуро-Зейской равнины и низкогорья Малого Хингана. М.: Изд-во МГУ. 1973. 276 с.

Иванов В.В., Махинов А.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Вертикальные русловые деформации на среднем Амуре // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2000. № 5. С. 32–38.

Карташов И.П. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран. М.: Наука. 1972. 184 с.

Ким В.И., Махинов А.Н. Гидрологические и геоморфологические последствия разработки русловых месторождений Амура // География и природные ресурсы. 1997. № 3. С. 75–82.

Короткий А.М. Анализ коррелятных отложений и реконструкция рельефа горных стран. М.: Наука. 1985. 189 с.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.

Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В., Заитов И.Р., Лебедева Н.В. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ. 1961. 196 с.

Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. О морфологических признаках современной аккумуляции в речной долине // Изв. АН СССР. Сер. Географ. 1963, № 3. С. 84–89.

Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 1986. 264 с.

Махинов А.Н. Русловые процессы и формирование поймы в условиях устойчивой аккумуляции наносов в долине реки // Геоморфология. 1990. № 3. С. 75–84.

Махинов А.Н. Приустьевые озера притоков р. Амур // Изв. РГО. 1992. Т. 124, вып. 3. С. 276–282.

Махинов А.Н. Закономерности формирования аккумулятивного рельефа в долинах рек // Исследования водных и экологических проблем Приамурья. Владивосток–Хабаровск: Дальнаука, 1999. С. 113–117.

Махинов А.Н. Современное рельефообразование в условиях аллювиальной аккумуляции. Владивосток: Дальнаука, 2006. 232 с.

Махинов А.Н. Эоловые формы рельефа в пойме реки Амур // Геоморфология. 2017, № 3. С. 52–62.

Махинов А.Н., Завадский А.С., Ким В.И., Чернов А.В., Губарева Е.К. Изменение русла реки Амур после наводнения 2013 года // Изв. РГО. 2016. Т. 148, вып. 3. С. 46–61.

Махинов А.Н., Ким В.И., Чалов Р.С., Чернов А.В. Изменение русловых процессов реки Амур в районе Хабаровска в результате строительства полузапруд в протоках Пемзенская и Бешеная // Сб. докл. конф. с междунар. участием «Регионы нового освоения: ресурсный потенциал и инновационные пути его использования», 19–22 сент. 2011 г., Хабаровск: [Электронный ресурс]. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН. 2011.

Махинов А.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Направленная аккумуляция наносов и морфология русла Нижнего Амура // Геоморфология. 1994. № 4. С. 70–78.

Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Врезание горных рек: скорости и причины // Природа. 1996. № 12. С. 36–45.

Сорокин А.П., Махинов А.Н., Воронов Б.А., Сорокина А.Т., Артеменко Т.В. Эволюция бассейна Амура в мезозое-кайнозое и ее отражение в современной динамике рельефа // Вест. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 72–80.

Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во МГУ. 2000. 216 с.

Чалов Р.С., Чернов А.В. Проблемы развития русла Амура в районе Амуро-Уссурийского водного узла // География и природные ресурсы. 2000. № 4. С. 93–98.

Chernov A.V. Formation of depositional zones in piedmont regions of the southern part of the Russian Far East and specifics of their land use // Antropopresia w górax i na przedpolu; zapiszmen w formah terenu I osqadach // Streszenia referatow I posterov. Głuchołazy, 24–27 czerwca 2008. P. 38–39.

ОБ АВТОРАХ

Чалов Роман Сергеевич, доктор географических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, rschalov@mail.ru.

Махинов Алексей Николаевич, доктор географических наук, заместитель директора Институ-

та водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск, ivep@ivep.as.khb.ru

Чернов Алексей Владимирович. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, alexey.chernov@inbox.ru

Иванов Вадим Витальевич (1956–2020), кандидат географических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

VERTICAL CHANNEL DEFORMATIONS ON THE MIDDLE AND LOWER AMUR RIVER AND THEIR REFLECTION IN THE MORPHOLOGY OF THE CHANNEL AND FLOODPLAIN

R.S. Chalov[1], A.N. Mahinov[2], A.V. Chernov[1], V.V. Ivanov[1]

[1]*M.V. Lomonosov Moscow State University*
[2]*Institute of water and ecology problems of the Far Eastern brunch of the Russian academy of sciences, Khabarovsk, Russia*

Abstract. The article examines the features of the morphology of the middle and lower reaches of the Amur River channel. They are characterized by vertical channel deformations with different directions and intensities. The sediment accumulation is observed on most of the middle reach of the Amur (except for the section where the Maly Khingan ridge intersects, where the channel is incised, and floodplain don't exist) and the entire lower reach of the Amur. A weak incision of the river is observed only below the confluence with the Zeya River. Increased sediment removal from the artificial channel is fixed in the lower reach of the Amur near the sandy Belaya Mountain (in the 20th century) after the construction of a hydroelectric complex on it. It led to a change from incision to accumulation in the first few tens of kilometers downstream, which has not yet manifested itself in the morphology of the river channel. Different directions of vertical deformations are recorded in the positions of the curves $Q=f(H)$. This is reflected in changes in the type of the river channel and the relief of the valley bottom. With the directed accumulation of sediments, the Amur in its lower reaches is characterized by an excess of the low-water level above the floodplain surface, widespread floodplain multi-branching, the widespread formation of a complexly branched channel, and on the tributaries (except for the large rivers – Sungari and Ussuri) estuarine lakes-spills. The channel becomes incised according to the geomorphological type, but branched, downstream from the city of Komsomolsk-on-Amur, as the Amur river crosses the spurs of the Sikhote-Alin ridge. The alternation of wide-floodplain, adapted and incised sections of the riverbed also occurs against the background of the directed accumulation of sediments, which is manifested in channel branches, floodplain multi-branching and estuarine lakes on tributaries in the estuarine part of the Amur River. Thus, throughout almost the entire middle and lower reaches of the Amur River, systematic accumulation of sediments occurs. It is caused by negative tectonic movements and is interrupted in the middle reaches of the Amur River by incision when it intersects positive structures. Long-term (on a geological time scale) intensive accumulation of sediments determines the morphology and dynamics of the Amur riverbed even in those areas where its rates are reduced or it is replaced by weak incision.

Keywords: Amur, riverbed, floodplain, river incision, directed accumulation of sediments, estuarine spills on tributaries

ACKNOWLEDGMENTS

It was carried out according to the plans of the Research and Development Laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes named after N.I. Makkaveev and the Departmentof Land Hydrology of Lomonosov Moscow State University, plans Research and Development of the IVEP Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (source materials) with the financial support of the Russian Science Foundation (project 23-17- 00065 – channel analysis).

REFERENCES

Ahmet'eva N.P. Paleogeografiya Nizhnego Priamur'ya. M.: Nauka, 1977. 112 s.

Belyj B.V., Chalov R.S. Rusloformiruyushchie raskhody vody i morfologicheskie tipy rusel na rekah Dal'nego Vostoka // Geomorfologiya, 1997, № 1. P. 58-65.

Geomorfologiya Amuro-Zejskoj ravniny i nizkogor'ya Malogo Hin-gana. M.: Izd-vo MGU, 1973. 4.1. 276 p.

Ivanov V.V., Mahinov A.N., Chalov R.S., Chernov A.V. Vertikal'nye ruslovye de-formacii na srednem Amure // Vest. Mosk. un-ta Ser. 5. Geografiya. 2000. № 5. P. 32-38

Kartashov I.P. Osnovnye zakonomernosti geologicheskoj deyatel'no-sti rek gornyh stran. M.: Nauka, 1972. 184 p.

Kim V.I., Mahinov A.N. Gidrologicheskie i geomorfologicheskie posledstviya razrabotki ruslovyh mestorozhdenij Amura // Geografiya i prirodnye resursy, 1997. № 3. P. 75-82.

Korotkij A.M. Analiz korrelyatnyh otlozhenij i rekonstrukciya rel'efa gornyh stran. M.: Nauka, 1985, 189 p.

Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v ee bassejne. M.: izd-vo AN SSSR, 1955. 347 p.

Makkaveev N.I., Hmeleva N.V., Zaitov I.R., Lebedeva N.V. Eksperimental'naya geomorfologiya. M: Izd-vo MGU. 1961. 196 p.

Makkaveev N.I., Chalov R.S. O morfologicheskih priznakah sovremennoj akku-mulyacii v rechnoj doline // Izv. AN SSSR. Ser. geograf. 1963, № 3. P. 84-89.

Makkaveev N.I., Chalov R.S. Ruslovye processy. M.: Izd-vo MGU. 1986. 264 p.

Mahinov A.N. Ruslovye processy i formirovanie pojmy v usloviyah ustojchivoj akkumulyacii nanosov v doline reki // Geomorfologiya. 1990. № 3. P. 75-84.

Mahinov A.N. Priust'evye ozera pritokov r. Amur // Izv. RGO. 1992.T.124, vyp. 3. P. 276-282.

Mahinov A.N. Zakonomernosti formirovaniya akkumulyativnogo rel'efa v dolinah rek // Issledovaniya vodnyh i ekologicheskih problem Priamur'ya. Vladivostok-Habarovsk: Dal'nauka, 1999. P. 113-117.

Mahinov A.N. Sovremennoe rel'efoobrazovanie v usloviyah allyu-vial'noj akkumulyacii. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. 232 p.

Mahinov A.N. Eolovye formy rel'efa v pojme reki Amur // Geomorfologiya. 2017, № 3. P. 52-62.

Mahinov A.N., Zavadskij A.S., Kim V.I., Chernov A.V., Gubareva E.K. Izmenenie rusla reki Amur posle navodneniya 2013 goda // Izvestiya RGO, 2016. T. 148, vyp. 3. P. 46-61.

Mahinov A.N., Kim V.I., Chalov R.S., Chernov A.V. Izmenenie ruslovyh proces-sov reki Amur v rajone Habarovska v rezul'tate stroitel'stva poluzaprud v protokah Pemzenskaya i Beshenaya // Sb. dokl. konf. s mezhdunar. uchastiem «Regiony novogo osvoeniya: resursnyj potencial i innovacionnye puti ego ispol'zovaniya», 19-22 sent. 2011 g., Habarovsk: [Elektronnyj resurs]. Habarovsk: IVEP DVO RAN. 2011.

Mahinov A.N., Chalov R.S., Chernov A.V. Napravlennaya akkumulyaciya nanosov i morfologiya rusla Nizhnego Amura // Geomorfologiya, 1994, № 4. P. 70-78.

Sidorchuk A.Yu., Chalov R.S. Vrezanie gornyh rek: skorosti i prichiny // Priroda. 1996. № 12. P. 36-45.

Sorokin A.P., Mahinov A.N., Voronov B.A., Sorokina A.T., Artemenko T.V. Evolyuciya bassejna Amura v mezozoe-kajnozoe i ee otrazhenie v sovremennoj dinamike rel'efa. // Vestnik DVO RAN, 2010, № 3. P. 72-80.

Chalov R.S., Lyu Shuguan, Alekseevskij N.I. Stok nanosov i ruslovye processy na bol'shih rekah Rossii i Kitaya. M.: Izd-vo MGU. 2000. 216 p.

Chalov R.S., Chernov A.V. Problemy razvitiya rusla Amura v rajone Amuro-Ussurijskogo vodnogo uzla // Geografiya i prirodnye resursy. 2000. № 4. P. 93-98.

Chernov A.V. Formation of depositional zones in piedmont regions of the southern part of the Russian Far East and specifics of their land use // Antropopresia w górax i na przedpolu; zapiszmen w formah terenu I osqadach // Streszenia referatow I posterov. Głuchołazy, 24-27 czerwca 2008. P. 38-39/

ABOUT THE AUTHORS

Chalov Roman Sergeevich, Doctor of geographical sciences, Professor Lomonosov Moscow State University, rschalov@mail.ru

Makhinov Alexey Nikolaevich, Doctor of geographical sciences, Deputy Director of the Institute of Water and Environmental Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, ivep@ivep.as.khb.ru

Chernov Alexey Vladimirovich, Doctor of geographical sciences, Lomonosov Moscow State University, Leading Researcher, alexey.chernov@inbox.ru

Ivanov Vadim Vitalievich (1956–2020), PhD in geography, Senior Researcher at the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University.

УДК 551.435.122, 551.4.06

ПОЛЕВОЙ МОНИТОРИНГ АЛЛЮВИАЛЬНОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ПОЙМЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. ОКИ

А.Ю. Воробьев*, В.А. Кривцов, А.В. Водорезов, А.Н. Варнаков, А.С. Кадыров

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, г. Рязань, Россия
**a.vorobyov90@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.01.2025
После доработки 20.02.2025
Принята к публикации 25.02.2025

Аннотация. С помощью метода седиментационных ловушек-матов показаны возможности и результаты геоморфологического мониторинга скорости аллювиального осадконакопления в пойме р. Оки. За период 2014–2021 гг. прохождение только двух весенних половодий приводило к затоплению центральной (высокой) поймы и аккумуляции слоя наилка мощностью 0.45 мм. На низкой пойме осадконакопление наблюдалось ежегодно, средняя мощность слоя минеральных (по ГОСТ 25100-2020) наносов на матах достигает 19.8 мм/год. Вглубь пойменно-русловых комплексов рельефа транспортируются только пылевато-глинистые наносы, а на прирусловых участках регистрировалась и аккумуляция песчаных частиц. В среднем высокая пойма на задействованных позициях мониторинга затапливается на 15 дней, что соответствует средней поемности по градации В.И. Шрага. На прирусловых же участках прямое взаимодействие водных масс потока и береговых грунтов может растягиваться на 1–6 месяцев и сильно зависит от типа весны и параметров половодья. Это позволяет выделить подобные обстановки осадконакопления как участки с регулярным проявлением флювиального морфолитогенеза, восприимчивые к колебаниям мезоклимата окского бассейна.

Ключевые слова: река Ока, пойма, седиментационная ловушка, половодье, аллювий, гранулометрический анализ, органическое вещество

DOI: 10.71367/3034-4638-2025-2-2-33-50

ВВЕДЕНИЕ

Одним из традиционных объектов исследований в динамической геоморфологии, несмотря на долгую историю изучения экзогенных процессов, остается рельеф пойм равнинных рек. Научный интерес поддерживается, в том числе, благодаря все более активному воздействию климатического и антропогенного факторов на флювиальные процессы (Фингерт, Крыленко, Головлев и др., 2018; Мохов, 2020; Горбаренко, Варенцова, Киреева, 2021). Геоморфологи сотрудничают со специалистами в самых разных областях знания (гидрологами, геохимиками, геоэкологами, инженерами-геологами), чтобы выявить причинно-следственные связи рельефообразования в днищах речных долин. Фоновые ландшафтные условия предопределяют целеполагание исследований, поэтому предметом региональных проектов нередко является преимущественное изучение пойменно-русловой аккумуляции или эрозии. В последние десятилетия развитие учения об эрозионно-русловых системах позволило выделить речные поймы на равнинах как крупные приемники наносов (Ciszewski, Czajka, 2015; Эрозионно-русловые..., 2017; Чалов, Ефимов, 2021). Ведущая роль аккумулятивных тенденций отражается в характерной фациальной структуре низко- и среднеэнергетических пойм (по классификации (Nanson, Croke, 1992)), в наличии развитой пойменной фации аллювия. Динамика и вещественный состав свежих наносов (наилка), которые в условиях гумидного умеренного климата отлагаются сравнительно регулярно, желательны к учету в почвоведении, геоэкологии, ландшафтоведении. Транспорт и аккумуляция твердофазного материала напрямую влияют на структуру природно-территориальных комплексов (Asselman, Middelkoop, 1995; Барышников, 2012; Александровский, Гласко, 2014; Draut, Ritchie, 2015; Вахрамеева, Лосюк, 2021), предпочтительные формы землепользования (Кононов, Пановская, 1973; Муромцев, Мажайский,

Семенов, 2011; Steiger, Gurnell, Petts, 2011; Zhao, Coles, Wu, 2015) и пополнение запаса биофильных химических элементов в синлитогенных почвах (Phillips, Walling, 1999; Шишов, 2006; Муромцев, Мажайский, Семенов, 2011; Барышников, 2012; Зайдельман, Беличенко, Бибин, 2013).

Приведенные характеристики и свойства физико-географических процессов характерны для поймы р. Оки в ее среднем течении. Этот участок в прошлом становился объектом мелиорации, фациально-генетического и гидролого-морфологического анализа (Муромцев, Мажайский, Семенов, 2011; Александровский, Гласко, 2014; Палатов, Новичкова, Быков, 2019; Воробьев, 2021). Фрагмент днища долины от устья р. Москвы до устья р. Мокши (850–354 км от устья р. Оки) отличается чередованием расширений и сужений, в которых ширина поймы варьирует от 1.0 до 12.0 км. Река Ока в Московской и Рязанской областях является крупной рекой со среднегодовым расходом >500 м^3/с, а аккумуляция аллювия в ней входит в число ведущих рельефообразующих процессов региона. Расширенные участки поймы прошли сложную плейстоцен-голоценовую эволюцию (Горбаренко, Варенцова, Киреева, 2021), создавшую сочетания морфологических комплексов рельефа с неодинаковым горизонтальным и вертикальным расчленением. Пространственное распределение современного осадконакопления на подобных участках усложняется, поскольку аккумулирующие емкости (межгривные ложбины, старичные и техногенные котловины, реликты термокарстового морфолитогенеза) образуют сложные системы понижений. Однако полевые данные о скорости аллювиального процесса, имеющиеся для региона (Лазаренко, 1964; Кононов, Пановская, 1973; Муромцев, Мажайский, Семенов, 2011), недостаточны для балансовых расчетов и геоморфологических прогнозов. Общие оценки, содержащиеся также в палеогеографических работах (Гласко, Фоломеев, 1981; Александровский, Гласко, 2014), предоставляют только усредненные данные роста поймы в высоту за последние сотни и тысячи лет. Недостаток информации о литологии свежих наносов объясняется, в том числе, трудоемкостью сбора полевого материала и необходимостью использования специальных средств для получения необходимого его количества. В ряде случаев, если это отвечает целям исследования, осадки собирают без пространственно-временной дифференциации (Шишов, 2006; Cotton, Wharton, Bass et al., 2006; Charlton, 2008; Hupp, Shenk, Kroes et al., 2015; Палатов, Новичкова, Быков, 2019) с поверхности осушек и отмелей.

К путям решения отмеченных противоречий в динамической геоморфологии относится создание стационаров (Симонов, 2005). Абсолютное преобладание аккумулятивных поверхностей в окской пойме благоприятно для применения метода седиментационных ловушек (матов), позволяющих получать точные значения скорости накопления аллювия на различных формах рельефа. Зарубежный опыт подобных исследований весьма обширен, однако существует разделение между ловушками, закрепляемыми на мелководье, и матами на относительно приподнятых участках поймы. Первые действуют в динамичном потоке; это трехмерные объекты – колбы со штырями, мешкообразные конструкции, ямы (Harris, Richards, 1995; Phillips, Walling, 1999; Goldschneider, Haralampides, MacQuarrie, 2007; Алексеевский, Белозерова, Чалов, 2012). Ловушки, закрепляемые на элементах пойменного рельефа, представляют собой искусственные поверхности (маты, коврики, оболочки, диски) для имитации природных материалов дна пойменного потока (Asselman, Middelkoop, 1995; Phillips, Walling, 1999; Hupp, Shenk, Kroes et al., 2015; Voss, 2017). Благодаря сезонности гидрографа активная ширина русел рек (термин Н.И. Алексеевского (Эрозионно-русловые..., 2017)) варьирует, осложняя контроль осадконакопления на низкой пойме возможным размывом поверхности. Наоборот, нерегулярные затопления рельефа более высоких гипсометрических уровней поймы приводят к потере седиментологической и геоморфологической информации в маловодные годы и фрагментируют ряды стационарных наблюдений.

Мониторинг обновления рельефа на регулярно затапливаемых участках остается одним из популярных методов геоморфологических стационарных исследований. Известны работы (Asselman, Middelkoop, 1995; Hupp, Shenk, Kroes et al., 2015), в которых осуществлялся успешный переход от точечных значений мощности слоя наносов (H) и их осадочных показателей (например, D_{50} – средний диаметр частиц) к растрам поверхностей на комплексах форм рельефа либо на отдельных его неровностях. Пространственно-временные признаки осадконакопления, такие как расстояние от меженного русла реки (L) и длительность затопления ловушек (T), при этом определяют возможность доставки осадка по шероховатой пойме (Cotton, Wharton, Bass et al., 2006; Charlton, 2008) и поемность ключевых участков мониторинга (Барышников, 2012; Ciszewski, Czajka, 2015; Янин, 2020). Региональные оценки современной динамики заполнения речных долин наносами, на наш взгляд, могут основываться на классификациях

обстановки осадконакопления с известными скоростями процесса и на расчетах баланса наносов в русловом и пойменном потоках. В последнем случае необходимы фактические данные («контрольные цифры») осадконакопления на профилях через днище долины, которые позволят выделить пойменные зоны преобладающей эрозии либо аккумуляции, наряду с русловым ложем, где имеют место оба процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Заложение профиля из 16 седиментационных ловушек в Рязанском расширении поймы р. Оки (рис. 1) позволило достичь основной цели — оценки ежегодной скорости накопления пойменного аллювия. Рельеф трансекты отличается полигенетичностью, сопряжением сегментно-гривистых генераций и обширных участков наложенной пой-

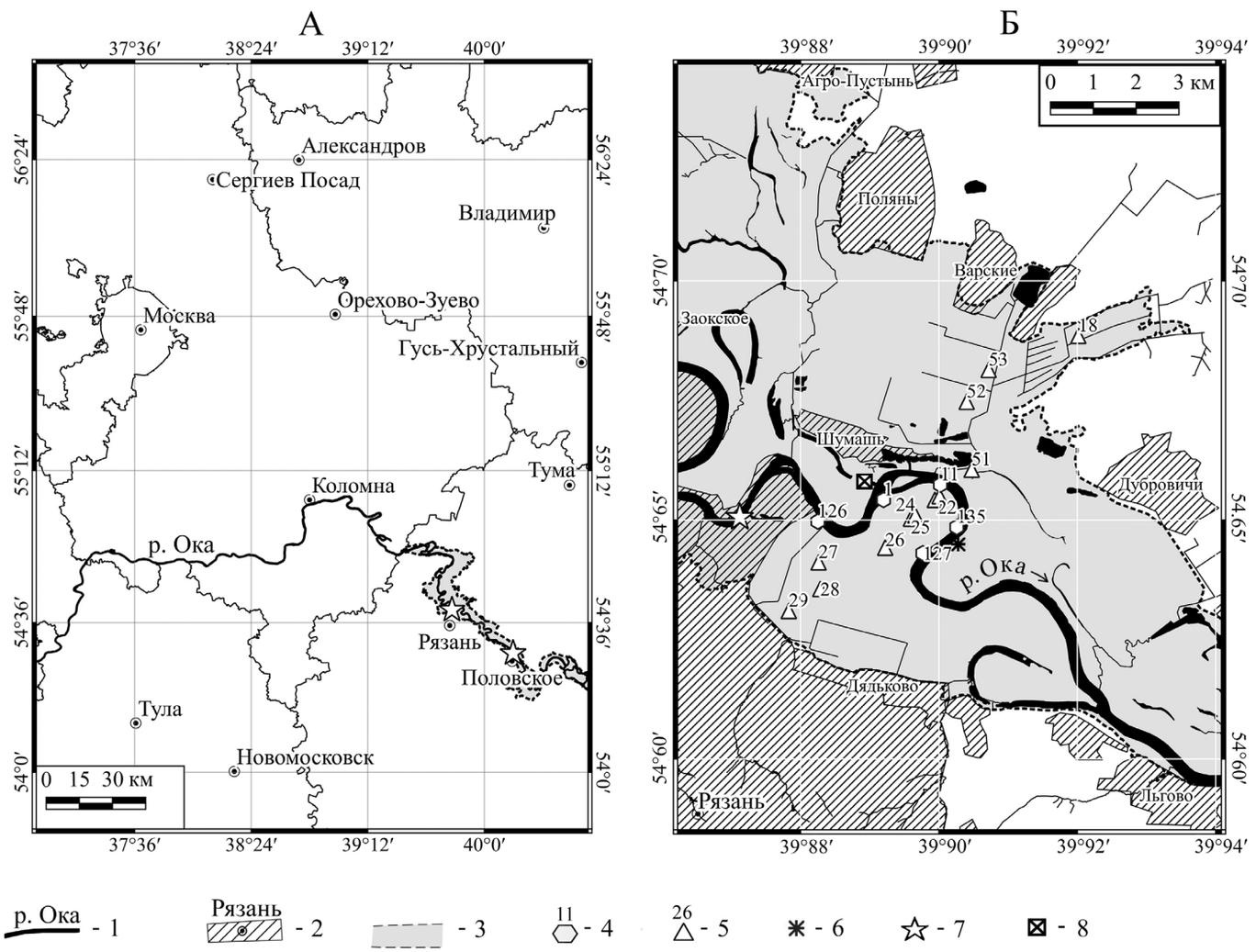


Рис. 1. Расположение района исследований (А) и профиля мониторинга рельефообразования (Б). 1 — реки; 2 — населенные пункты; 3 — пойма р. Оки в Рязанской обл.; 4 — седиментационные ловушки на прирусловой пойме; 5 — то же на высокой пойме: 6 — разрез высокой поймы, вскрывающий наложенный прирусловой вал; 7 — гидрологические посты Рязань и Половское; 8 — яхт-клуб «Маяк»

Fig. 1. Location of the study area (A) and the relief formation monitoring profile (Б). 1 — rivers; 2 — settlements; 3 — Oka River floodplain in Ryazan Oblast; 4 — sedimentation traps on the near-channel floodplain; 5 — also on the high floodplain: 6 — section of the high floodplain, revealing the natural levee; 7 — gauging station 'Ryazan' and 'Polovskoye'; 8 — yacht club 'Mayak'

мы, вовлеченных в аллювиальный режим лишь во второй половине голоцена. Необходимость учета всех субфациальных зон, в частности, таких как межгривные понижения, прирусловые валы и отмели, превращает профиль в трехмерную полосу мониторинга шириной около 1.5–2.0 км. Общая его длина – 9.4 км, причем крайние точки (ловушки № 29 и № 18) располагаются соответственно на окраине областного центра и в притеррасном заболоченном понижении. В пределах Кальновской излучины, вершина которой обращена на северо-восток, закреплялось 8 сборников аллювия. Хотя двухсторонняя пойма на трансекте и может быть разделена на традиционные зоны (прирусловая, центральная и притеррасная) (Лазаренко, 1964), большее функциональное значение имеет гипсометрическое положение ловушек. Выделяются прирусловые (низкие) позиции (точки мониторинга № 1, 11, 126, 127, 135), соответствующие субфациям оснований прирусловых валов, прирусловых отмелей и затонов. Высота таких позиций относительно меженного русла не превышает 1.0 м. На высокой пойме (точки наблюдения № 18, 22–29, 51–53) ловушки располагаются на положительных и отрицательных формах рельефа, соотносясь с субфациями выровненных участков, грив, межгривных ложбин и старичных понижений, и приподняты на 3.0–5.5 м над урезом Оки.

Седиментационные ловушки представлены ковриками из резины (рис. 2) с габаритами 40 × 60 см, симулирующими естественную дневную поверхность рельефа. Дублирование ковриков матами из кокосового волокна не выявило существенной связи между материалом сборника аллювия и параметрами наилка (Воробьев, Кривцов, Кадыров, 2021), поэтому анализируются только результаты, полученные с резиновых ловушек. Методика установки и изъятия ковриков была подробно изложена

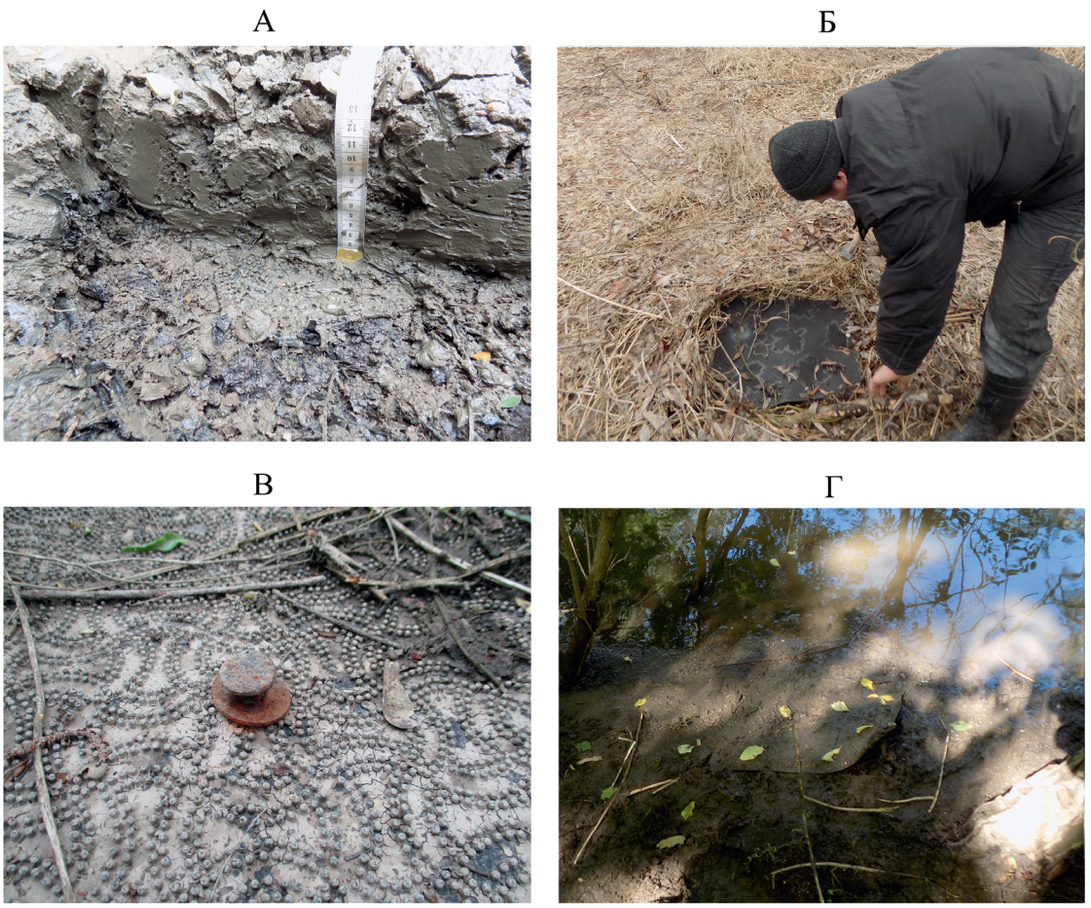


Рис. 2. Примеры наилка на седиментационных ловушках перед их снятием. А – установка и маркировка ловушки № 11; Б – ловушка № 11 после половодья 2021 г.; В – наилок на ловушке № 126 после половодья 2016 г.; Г – ловушка № 127 после половодья 2021 г.

Fig. 2. Sediments on sedimentation traps before their removal. А – trap No. 11 after the 2021 flood; Б – installation and labelling of trap No. 11; В – sediments on trap No. 126 after the 2016 flood; Г – trap No. 127 after the 2021 flood

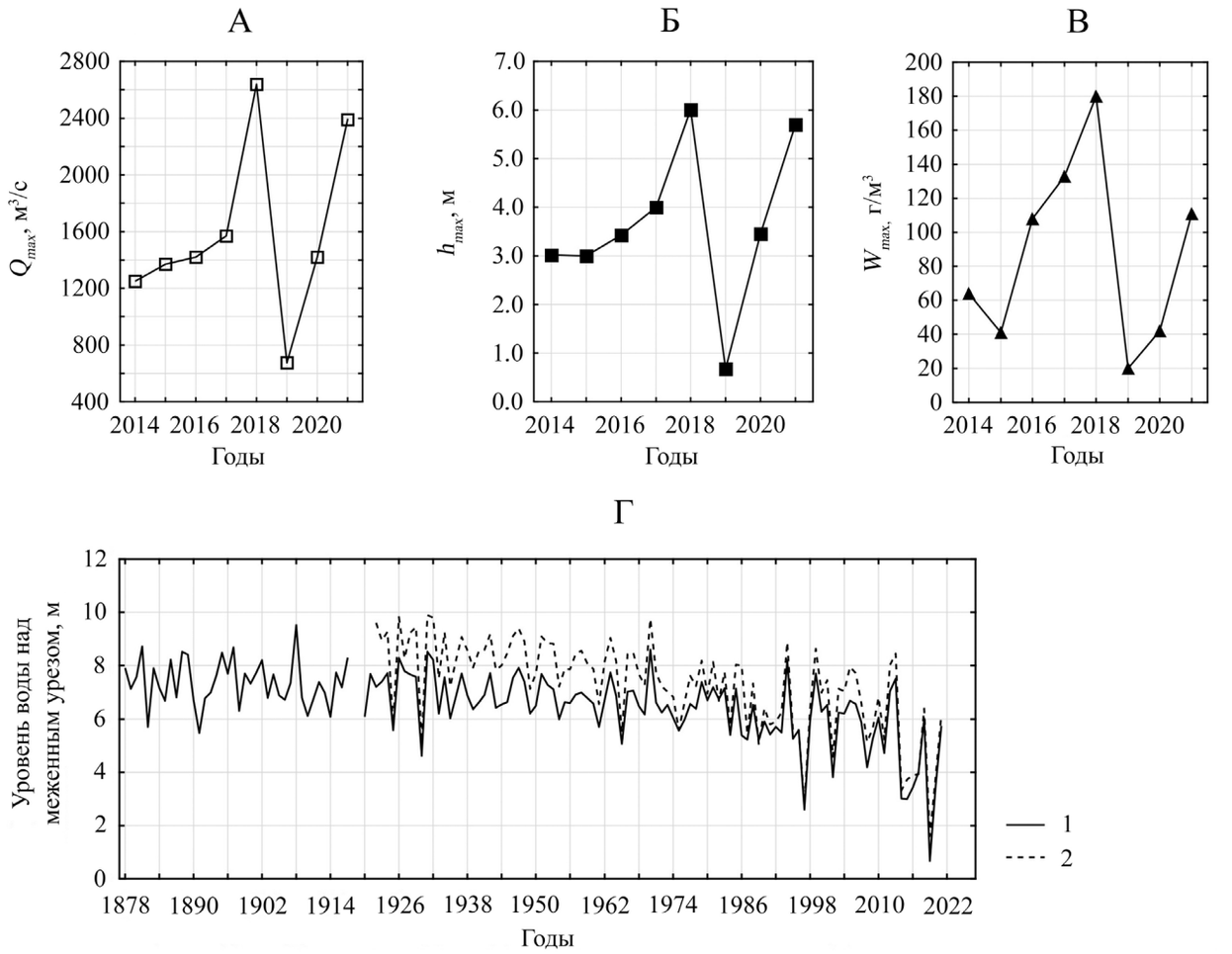


Рис. 3. Динамика элементов водного режима р. Оки в районе исследований. А — максимальные расходы, г.п. Половское; Б — максимальные уровни, г.п. Рязань; В — средняя мутность в половодье между г.п. Калуга и Муром; Г — максимальные уровни на р. Оке: 1 — г.п. Рязань, 2 — г.п. Половское

Fig. 3. Dynamics of the Oka River water regime elements in the study area. A — maximum flow discharge, gauging station Polovskoye; Б — maximum levels, gauging station Ryazan; B — average turbidity in the flood between Kaluga and Murom; Г — maximum levels on the Oka River gauging station: 1 — Ryazan, 2 — Polovskoye

нами ранее (Воробьев, Кадыров, 2020; Воробьев, Кривцов, Кадыров, 2021). Соответственно точкам наблюдения, стационарный мониторинг состояния геокомплексов велся в 2014–2021 гг. на 16 позициях, которые располагались на расстоянии от 8 до 4600 м от русла Оки. Период затопления ловушек был подвержен существенным колебаниям, как из года в год, так и от места к месту. В среднем он составлял 73 дня для сборников аллювия на прирусловых позициях и 15 дней на высокой пойме.

Годы полевого мониторинга пришлись на период нестабильного стока р. Оки (Горбаренко, Варенцова, Киреева, 2021), который на створе г.п. Половское колебался в пределах 10.2–17.2 км³/год. Максимальных значений суточные расходы (Q_{max}) достигали в 2018 г. (2640 м³/с) и в 2021 г. (2390 м³/с) (рис. 3). Во всех остальных случаях раннее снеготаяние, обусловленное вторжением теплого воздуха с ветрами западных и южных румбов, помешало формированию нормального половодья. Аналогичные колебания испытывали максимальная мутность потока (W_{max}) и уровень Оки (H_{max}). Паводки высотой не более 4.0 м над меженным уровнем затапливали во время своих пиков только ловушки на прирусловых позициях, поэтому параметры осадконакопления для остальных сборников аллювия на графике (рис. 4) равны нулю. Стабильная аккумуляция аллювия сохранялась только на определенном расстоянии от окского русла, тогда как в годы с затоплением 55–65% высокой поймы наблюдалось формирование мощных пойменных потоков и наполнение аккумулирующих емкостей

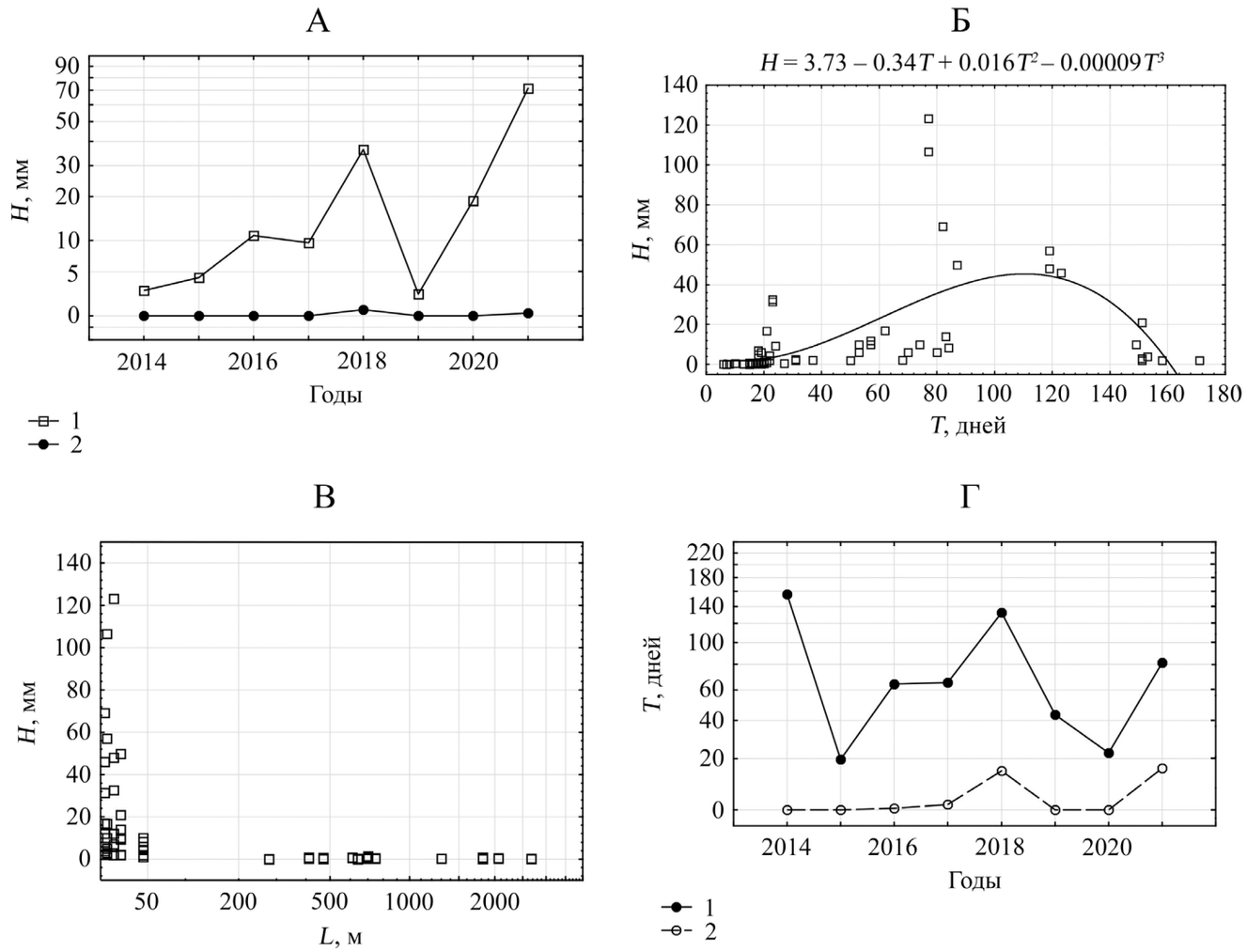


Рис. 4. Результаты определения скорости аккумуляции аллювия на пойме разной высоты. А — средняя мощность слоя наилка *H* в ловушках; Б — связь длительности затопления *T* и мощности слоя наилка *H*. В — связь мощности слоя наилка *H* и расстояния от русла реки; Г — средняя длительность затопления ловушек *T* в 2014–2021 гг. 1 — прирусловая пойма; 2 — высокая пойма

Fig. 4. Results of determining the rate of alluvium accumulation on the floodplain of different heights. A — average thickness of the layer of silt *H* in traps; Б — relationship between the duration of flooding *T* and the thickness of the layer of silt *H*. В — relationship between the thickness of the layer of silt *H* and the distance from the river channel; Г — average duration of trap flooding *T* in 2014–2021. Floodplain: 1 — riverine; 2 — high floodplain

(Воробьев, 2021). В 2019–2020 гг. весенние половодья были практически не выражены. Аномальным следует считать летний дождевой паводок 2020 г., который был принят нами за аналог «половодья». Он был вызван ливнями на западе и юге окского бассейна — продуктами взаимодействия воздушных масс из Скандинавии и с Черного моря. В период 29.05.2020–01.06.2020 выпало до 100 мм осадков, что обеспечило устойчивый подъем воды, благодаря чему на один год р. Ока приобрела гидрограф, сходный с таковым у северокавказских рек.

Собранный с ловушек наилок представляет собой литологический документ, фиксирующий последствия гидрологических событий. Информация о вещественном составе наилка получена посредством сочетания ситового и пипеточного гранулометрического анализа (ГОСТ 12536-2014, 2019). Комплекс из 18 сит использован для разделения песчаных фракций в соответствии с градацией Вентворта (Gradziński, Kostecka, Radomski, 1976; Oldfield, Hao, Bloemendal, 2009), а содержание пылевато-глинистых частиц определено согласно ГОСТ 12536-2014. Ока относится к рекам с песчаным дном (Палатов, Новичкова, Быков, 2019; Воробьев, Кадыров, 2020), поэтому частицы крупнее 2.0 мм в наилке, как правило, отсутствуют. Доля

органического вещества ($C_{общ}$) в отложениях также считается значимым показателем-индикатором в инженерно-геологических (Коробкин, Передельский, 2013), гидрохимических (Чеснокова, Савельев, Злывко и др., 2013; Щеголькова, Веницианов, Звезденкова и др., 2016; Опекунов, Митрофанова, Опекунова, 2017) и педологических (Шишов, 2006; Зайдельман, Беличенко, Бибин, 2013; Zhao, Coles, Wu, 2015; Мартынов, 2019) исследованиях. В большинстве проб аллювия с ловушек, помимо основного минерального компонента, обнаружена также органическая составляющая, хотя встречаются и промытые образцы. Аналитическая работа по определению $C_{общ}$ проведена в САС «Рязанская», использован фотометрический метод (метод И.В. Тюрина, ГОСТ 26213-2021 (ГОСТ 26213-2021, 2021), заменивший ГОСТ 26213-91). Минимальный объем навески почвогрунтов по упомянутым нормативам в 20 раз меньше, чем для анализа прокаливанием до постоянной массы (по ГОСТ 23740-2016), что становится значимым при слое наилка <1.0 мм.

Органическое вещество наилка входит в геохимический цикл углерода, пополняя его запасы в резервуарах почв, седиментов и педоседиментов. На поймах ряда рек западной части окского бассейна аллювиальный процесс компенсирует минерализацию гумуса на фоне интенсивного овощеводства (Муромцев, Мажайский, Семенов и др., 2011; Зайдельман, Беличенко, Бибин, 2013). Землепользование в Рязанском расширении поймы представлено сенокошением, пастбищным и лесным хозяйством, значительны площади залежных земель. Однако и здесь естественное луговое состояние почв поддерживается за счет доставки органоминеральных наносов, осуществляемой с неодинаковой продолжительностью. Возникает необходимость типизации наблюдаемых ситуаций осадконакопления по их длительности (рис. 5). Для этого мы обратились к классификации поемности В.И. Шрага (Шишов, 2006) с принятыми в ней следующими градациями: К (короткопоемные участки) – 0–7 дней затопления, С (среднепоемные) – 8–15 дней, П (продолжительно поемные) – 16–30 дней, Д (долгопоемные) – 30 дней.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средняя мощность слоя наилка на всех ловушках за 7 лет мониторинга составила 12.4 мм. Значения параметра H колеблются на прирусловых участках от 1.0 мм до 123.2 мм и, в общем, прямо связаны с вариациями мощности половодного потока и мутности. Низкие паводки, инспирированные февральско-мартовским снеготаянием, отлагают слои наносов толщиной менее 17 мм. В эти годы отмечалось ослабление переработки берегов Оки водным потоком. В процесс поступления вещества были недостаточно включены водосборные части эрозионно-русловой системы Окского бассейна. Наносы бассейнового и руслового генезиса в ограниченном количестве поступали на прирусловые участки, где около 80% случаев аккумуляции зафиксированы в долгопоемных условиях.

Двукратные различия между H_{2018} и H_{2021} объясняются прежде всего прогрессирующей промышленной и рекреационной нагрузкой в окрестностях трансекты мониторинга. За 2014–2021 гг. площадь строительных карьеров на участке поймы между селами Шумашь, Красный Восход и Дубровичи увеличилась на 30 га. Это сопровождалось антропогенной эрозией примерно 150 000 м^3 плодородного почвенного слоя, формирующего верхнюю часть грунтов пойменной фации аллювия (aIVp). При затоплении грунты с нарушенным сложением на стенках карьеров и выемок становятся источником взвеси для половодного потока. Кроме того, на верхнем крыле Кальновской излучины в 2017 г. началось заложение туристического объекта «Яхт-клуб «Маяк» (Яхт-клуб «Маяк», 2024) (см. рис. 1). Основные земляные работы по расчистке затона р. Оки здесь пришлись на 2020–2022 гг. Результатом планации и нарушения естественной геометрии берегов заводи стало накопление мощного (местами до 150 мм) слоя пылевато-глинистого наилка в 2021 г. на аккумулятивном берегу Кальновской излучины р. Оки (ловушки № 11 и 135) (см. рис. 2). Подобные случаи локального нарушения баланса эрозии и аккумуляции наносов в системе «пойма–русло» на реках, подобных Оке, довольно многочисленны (Ciszewski, Czajka, 2015; Draut, Ritchie, 2015; Эрозионно-русловые..., 2017). При разрушении дамб и антропогенном моделировании рельефа в таких поймах ниже по течению от места техногенного воздействия может наблюдаться разовая аккумуляция наилка мощностью до 0.5–1.0 м.

Средняя продолжительность весенних максимумов стока в годы исследования колебалась от 20 до 160 дней. Динамика синоптических факторов формирования талого стока в холодные сезоны была существенно различной. Наблюдались как теплые или очень короткие малоснежные зимы (2014–2016, 2020 гг.), так и сезоны с преждевременными затратами значительных влагозапасов снега (2017 и 2019 гг.), а также «обычные» суровые зимы (2018 и 2021 гг.). В контексте интенсивности осадконакопления энергия потока оказывается важнее времени контакта воды и поверхности ре-

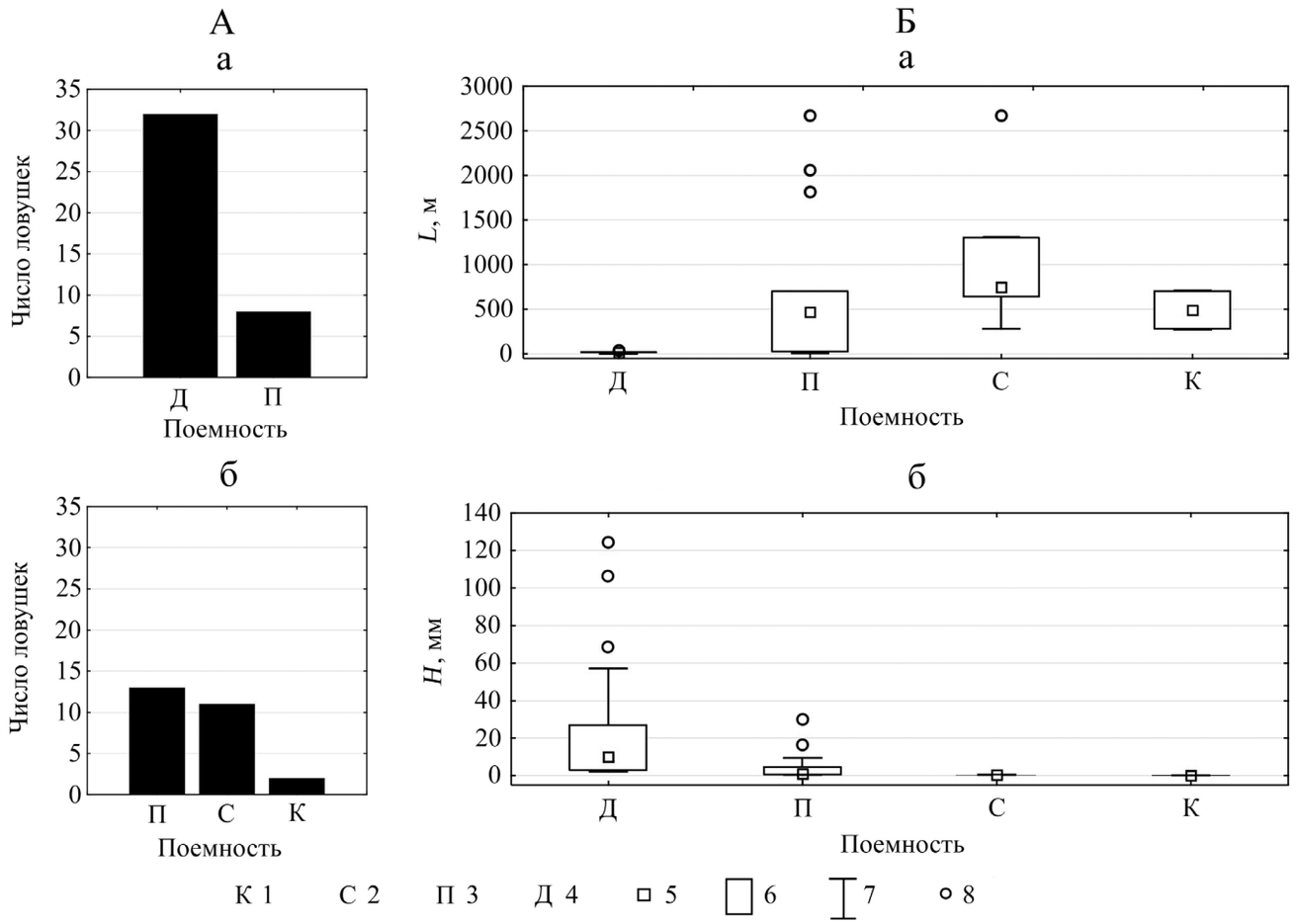


Рис. 5. Распределение поемности седиментационных ловушек по классификации В.И. Шрага. А – типы поемности, по В.И. Шрагу: а – низкая пойма, б – высокая пойма. Б – поемность: а – в зависимости от расстояния до ловушек от русла *L*, б – мощность пойменного наилка. Поемность: 1 – краткая, 2 – средняя, 3 – продолжительная, 4 – долгая. Элементы дисперсионного анализа: 5 – медиана, 6 – квартильный размах, 7 – 9% и 91% обеспеченности, 8 – выбросы

Fig. 5. Distribution of sedimentation trap according to V.I. Shrag classification. A - types of floodplain capacity according to V.I. Shrag: a – low floodplain, б – high floodplain. Б – pomacity: a – depending on the distance of traps from the channel *L*, б – thickness of floodplain silt. Flood duration: 1 – low, 2 – medium, 3 – long, 4 – over long. Elements of variance analysis: 5 – median, 6 – quartile range, 7 – 9% and 91% availability, 8 – outliers

льефа. В частности, после летнего паводка 2020 г. с ловушек снят слой аллювия, вдвое превышающий по параметру *H* наносы половодья 2017 г., в то время как продолжительность последнего была втрое большей (см. рис. 4). Одинаково маломощный (<7 мм) аллювий был собран в 2014–2015 гг., хотя средний T_{2014} = 160 дней, а T_{2015} = 20 дней.

Надежным индикатором преобладающих седиментационных тенденций в тот или иной сезон является параметр D_{50}, который примерно соответствует диаметру частиц, наиболее устойчивых на дне потока (Gradziński, Kostecka, Radomski et al., 1976). Для сезонов 2015–2018 гг. и 2020 г. средняя крупность частиц соответствует мелкому песку – типичной разновидности грунта подводных частей окских прирусловых отмелей (рис. 6) (Лазаренко, 1964; Гласко, Фоломеев, 1981). Ближе к пристрежневой части руслового сечения донные отложения р. Оки обычно выполнены крупным и гравелистым песком (Лазаренко, 1964). Роль циркуляционных течений, по-видимому, была наибольшей при формировании наилка 2018 г. Доля частиц 0.25–1.0 мм в данном сезоне достигает 31%, а значение D_{50} почти приурочено к межфракционной границе мелкого и среднего песка. На ловушках № 1, 11 и 135 присутствовали, хоть и в небольшом количе-

стве, частицы фракции 0.5–1.0 мм. Их движение начинается при довольно высоких скоростях течения (около 0.3–0.4 м/с) (Phillips, Walling, 1999; Эрозионно-русловые..., 2017), однако тот факт, что главным компонентом осадков являются частицы диаметром 0.1–0.3 мм, свидетельствует о том, что перемещение самого крупного материала осуществлялось при высокоамплитудных пульсациях скорости потока. Поскольку образования грядовых микроформ зафиксировано не было, можно заключить, что перенос влекомых наносов происходил преимущественно в гладкой фазе. Заиление поверхности рельефа русла отсутствовало, и был возможен размыв отмелей. Однако более вероятна миграция псаммитового материала из приглубых участков русла и быстрая остановка частиц вне активной зоны последнего.

Отмеченный механизм доставки влекомых наносов на пойму иногда реализуется и при формировании наложенных прирусловых валов (рис. 6), часто встречающихся в районе исследования. В их составе велика роль фракций мелкого и среднего песка, которые на трансекте Рязань–Красный Восход за семь лет выполнили 48% объема осадков низкой поймы. Сходные результаты для субфаций прирусловых отмелей (их высоких тыловых частей) и валов на средней Оке были получены еще в середине XX в. (Лазаренко, 1964). В то время осадки аккумулятивных берегов соответствовали промытым от ила и детрита пескам с небольшой примесью алеврита. Единичные текстуры заиления с многочисленной фауной *Dreissena polymorpha, Viviparus viviparous, Unio pictorum* и *Sphaerium rivicola* литологически документировали паводки с пониженной энергией рельефообразования.

Максимум полинома $D_{50} = f(T)$ приходится на интервал 80–140 дней (рис. 7), однако фактические данные на двухосевом графике распределены слишком неравномерно, чтобы считать зависимость надежной. Тем не менее энергия транспортирующей среды достигает наибольших значений в продолжительно- и долгопоемных условиях, что соответствует прирусловой обстановке осадконакопления. Доля песка возрастает при увеличении мощности слоя наносов и глубины затопления при руслонаполнении. Плавный рост кривой продолжается

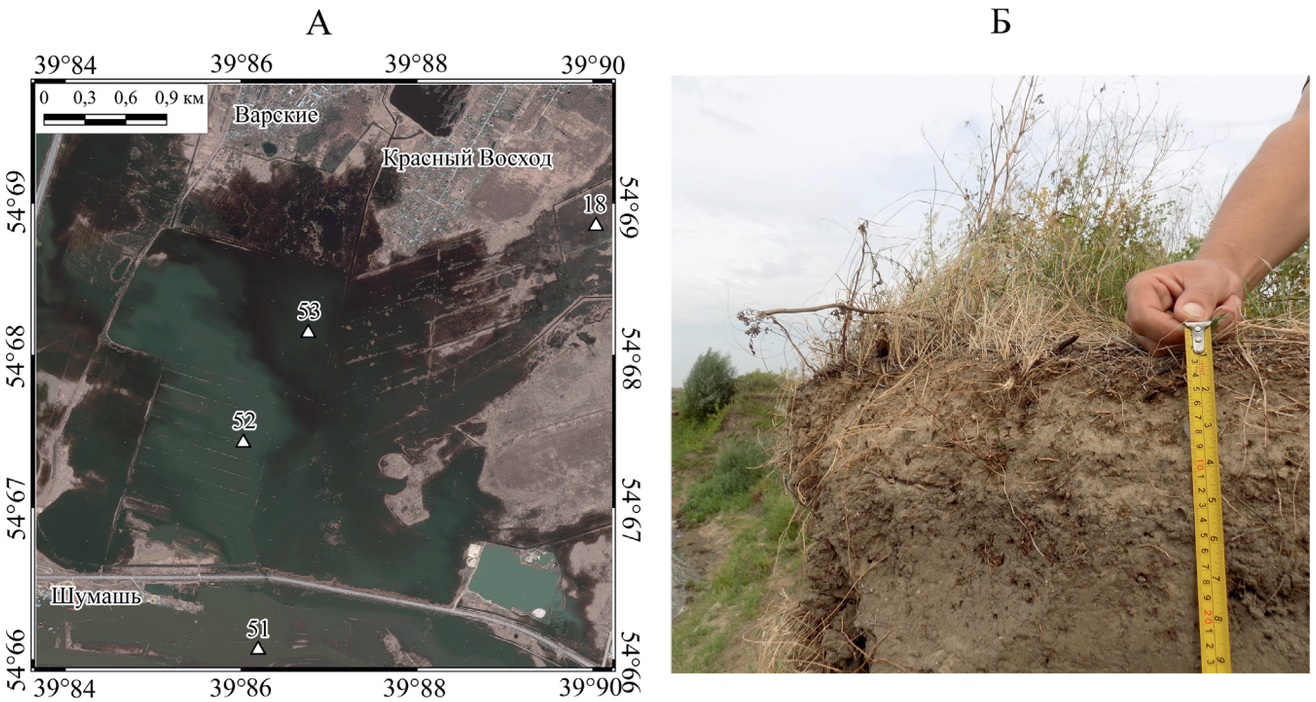


Рис. 6. Пойменные отложения наложенного прируслового вала и анизотропия пойменного потока по мутности на спутниковом снимке. А – пойменный поток в половодье 2018 г., поступление наносов на центральную пойму (спутниковый снимок Yandex. Satellite). Б – наложенный прирусловой вал на подмываемом берегу высокой поймы (см. рис. 1)

Fig. 6. Floodplain deposits of the natural levees and anisotropy of floodplain flow in terms of turbidity in the satellite image. А – floodplain flow in the flood of 2018 – sediment inflow on the central floodplain (Yandex. Satellite image). Б – natural levee on the concave bank of the high floodplain (see fig. 1)

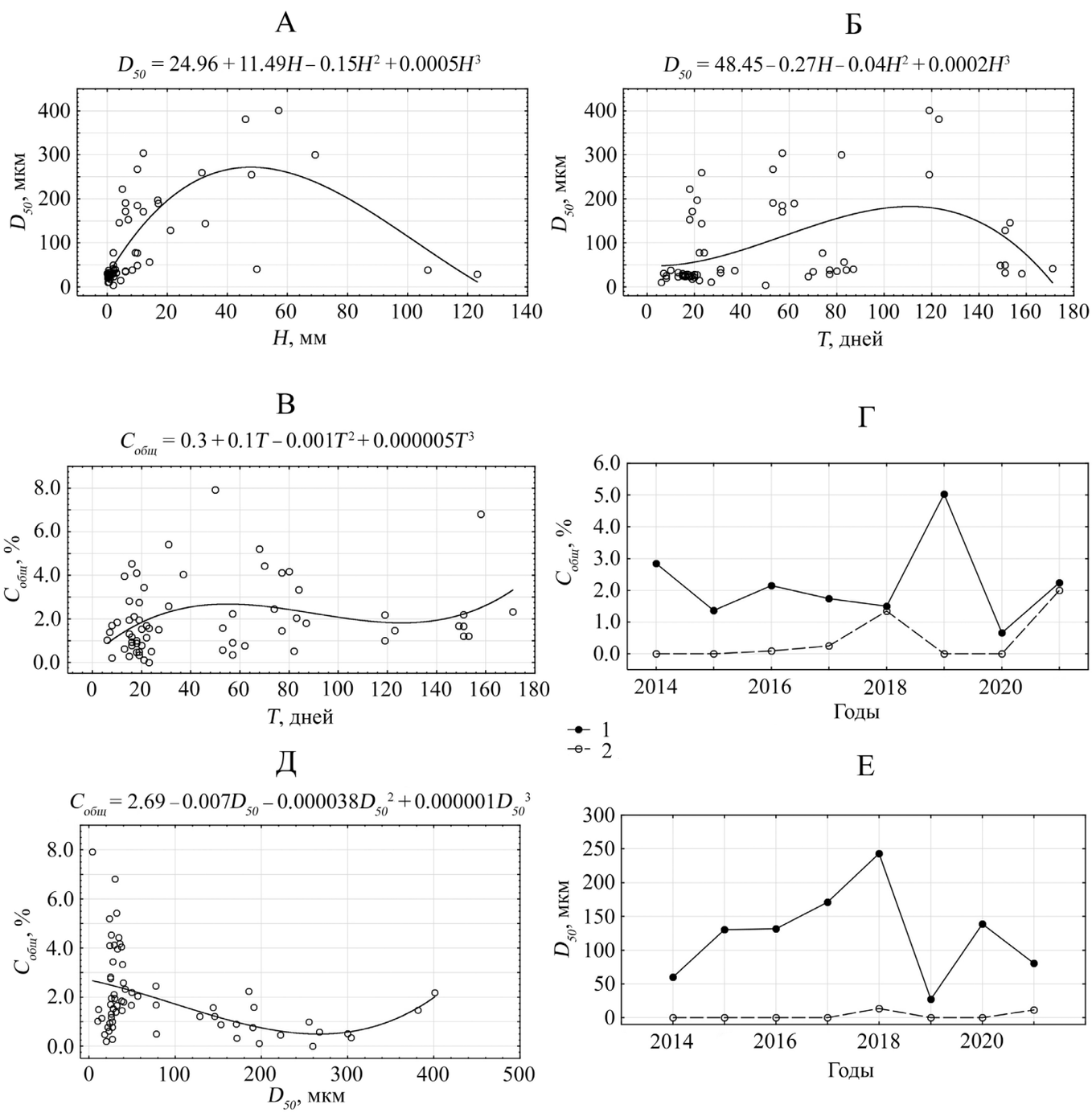


Рис. 7. Вещественный состав наилка, снятого с седиментационных ловушек. А — связь мощности наилка H и средней крупности частиц D_{50}. Б — связь длительности затопления ловушки T и D_{50}. В — связь содержания органического вещества $C_{общ}$ и длительности затопления ловушек T. Г — содержание органического вещества в наилке. Д — связь $C_{общ}$ и D_{50}. Е — D_{50} в ловушках. 1 — прирусловая пойма; 2 — высокая пойма

Fig. 7. Substantial composition of sediments removed from sedimentation traps. A — correlation of sediments H and average particle size D_{50}. Б — relationship of trap flooding duration T and D_{50}. В — relationship of soil organic matter content (SOC) and duration of trap flooding T. Г — SOC in the sediments. Д — relationship between SOC and D_{50}. E — D_{50} in traps. 1 — riverine floodplain; 2 — high floodplain

от первых дней до четырех месяцев нахождения ловушки под водой, однако далее по графику резко падает. Устойчивый паводочный подъем воды в пойме является интегральным следствием функционирования эрозионно-русловой системы. Чем дольше половодье, тем большая часть от потенциальной гидрологической емкости бассейна задействуется. При кратковременных и невысоких паводках горизонтальные русловые деформации затухают, экспорт наносов из пойменных берегов снижается. Опыт отечественных и зарубежных исследований в районах с холодным периодом года (Charlton, 2008; Коробкин, Передельский, 2013) свидетельствует, что весной требуется некоторое время для оттаивания береговых грунтов и насыщения геологических тел откосов капиллярной и гравитационной влагой. В 2015 г. зима была короткой, половодье слабо выраженным, а скорость боковой эрозии на многих излучинах р. Оки не превышала 0.2 м (Воробьев, Кривцов, Кадыров, 2021). Реализация транспортирующей способности потока на аккумулятивных берегах региона в значительной мере происходила за счет влекомых наносов. Поэтому значения D_{50} на втором году наблюдений находятся в интервале 0.125–0.25 мм при среднем $H = 4.2$ мм. Хотя значительное количество аллохтонного органического вещества поступает в пойму Оки с водосборов верхней части бассейна, микроагрегаты, детрит и древесный уголь дневных и погребенных почв, извлекаемые из размываемых берегов реки, также являются источником материала для наилка. Относительная стабильность откосов русла позволяет, по крайней мере частично, объяснить низкое содержание углерода в свежем аллювии 2015 г.

Дефицит руслообразующих наносов в продуктах аккумуляции на сборниках аллювия наблюдался в 2014 и в 2019 гг. На протяжении зимне-весеннего паводка первого года мониторинга источники твердофазного материала для потока ограничивались техногенными стоками, отложениями на дне и на подводных частях русловых откосов. То же можно сказать и о наиболее низком за 145-летний период инструментальных наблюдений половодье 2019 г. Практически весь аллювий в обоих случаях представлен частицами <0.063 мм, в среднем около 5% его приходилось на органическую составляющую. По нашим данным, в отложениях, слагающих берега отдельных затонов на средней Оке в 2019 г., $C_{общ}$ достигал 10–13%, что сопоставимо с донными отложениями озер (Вахрамеева, Лосюк, 2021). В ловушке № 126, расположенной в аналогичной седиментационной обстановке, в 2019 г. $C_{общ} = 7.9\%$. Заиление за счет коллоидов и мелкого алеврита вместе с аккумуляцией детрита обеспечивалось низкими скоростями потока в половодье. Санитарное состояние берегов ухудшилось, однако при вскрытии консолидированных отложений отмелей в 2020–2023 гг. обнаружено, что маломощные прослои тонкодисперсного материала сохраняются плохо. Вероятно, он фильтруется глубже в грунт, размывается ливневыми осадками, перемешивается инфауной при подтоплении и затоплении в летние паводки. Токсикологические риски возрастают не только для животных, но и для различных экологических групп водных растений, поскольку, например, для произрастания макрофитов оптимальные условия складываются в акваториях с замедленным водообменом (Cotton, Wharton, Bass et al., 2006; Янин, 2020). Маломощные половодья с низким разбавлением и ослаблением способности р. Оки к самоочищению также снижают рекреационный потенциал берегов водотока (Щеголькова, Веницианов, Звезденкова и др., 2016).

Полное отсутствие даже тонкого песка зафиксировано в сборниках аллювия на высокой пойме, который чаще всего отлагается в средне- и продолжительно поемных условиях (см. рис. 5). Средняя скорость накопления аллювия составляет 0.45 мм/год, максимальная – 1.5 мм/год. Наилок отличается пылевато-глинистым составом и относится к продуктам аккумуляции взвешенных наносов бассейнового и руслового генезиса. Средний диаметр его частиц достигает 0.025 мм. По данным С.Р. Чалова и В.А. Ефимова (Чалов, Ефимов, 2021), он соответствует «седловине» дифференциальной кривой гранулометрического состава взвешенных наносов р. Оки. Основной вклад в формирование взвеси должен быть приурочен к интервалу размерности 0.06–0.09 мм, но полученные нами данные близки к транзитному материалу р. Москвы ($D_{50} = 0.01$ мм). Очевидно существование ландшафтных ограничивающих факторов при транспорте твердофазного материала вглубь поймы Оки и, как выяснилось, его оценка по параметру L может быть довольно грубой.

Топографические и дистанционные данные свидетельствуют о воздействии на транспорт наносов геометрии рельефа и объектов инфраструктуры (см. рис. 7). Дамба Солотчинского шоссе преграждает путь пойменному потоку, подпор которого выше сооружения по результатам моделирования в Stream-2D составляет +0.5 м (Фингерт, Крыленко, Головлев, 2018). На левобережной пойме в границах трансекты мониторинга гребень паводка понижен на 0.13 м. Дешифрирование спутниковых снимков Yandex Satellite, сделанных на пике половодья 2018 г., показало существование здесь линии тока взвешенных наносов. Она пролегает по мели-

оративным каналам и естественным понижениям, постепенно трансформируясь на центральной пойме в однонаправленное течение шириной до 0.9 км. Высокие концентрации взвеси в окрестностях ловушки № 53 и более осветленный поток около сборника аллювия № 52 определяют трехкратную разницу в значениях H (0.9 и 0.3 мм).

Несоответствие поемности и аллювиальности в полной мере проявилось в слое наилка в ловушке № 18, расположенной близко к границе затопляемой поймы (Воробьев, 2021). В весенний сезон 2018 г. и в последнем году мониторинга мощность наилка здесь не превышала 0.1 мм. Оба холодных сезона с затоплением данного притеррасного участка не оставили литологических записей, поскольку твердофазное вещество, видимо, было представлено биомассой (торфом, пыльцой, микроостатками организмов). Основной источник доставки минеральных взвешенных наносов (русло Оки) располагается на расстоянии 4.6 км, разрабатываемые пойменные карьеры – в 3.4–3.6 км, а примыкающая первая надпойменная терраса обладает слишком низкой энергией рельефа для инспирирования активной литодинамики при подтоплении.

Явной зависимости между обогащением наносов углеродом и длительностью затопления сборников аллювия не выявлено. На территориях, граничащих с Рязанским расширением днища окской долины, расположено 27 сельских населенных пунктов и областной центр – г. Рязань с мощным комплексом предприятий нефтехимической, строительной и машиностроительной отраслей промышленности. Пойменные массивы и примыкающие к ним территории используются под пастбища для крупного рогатого скота, овощное хозяйство, развито сенокошение, в прошлом – добыча торфа. Отсюда наличие множества трудно прогнозируемых диффузных и точечных источников поступления органических веществ как в русловой, так и в пойменный поток во время максимума половодья. Методологически контроль вклада точечных источников экотоксикантов должен осуществляться на створах выше и ниже по течению водотока от источника (Щеголькова, Веницианов, Звезденкова и др., 2016). Диффузное поступление $C_{общ}$ на центральную пойму может обеспечиваться и местными запасами углерода в гумусовых и органогенных (торфяных) горизонтах почв. Так, вымывание углерода из гумусово-аккумулятивного горизонта педонов, установленное на р. Амур по микроэлементам-маркерам (Мартынов, 2019), развивается при длительном затоплении на фоне восстановительных процессов и подкисления почв.

Более очевидна связь между D_{50} и $C_{общ}$. Несмотря на сглаженную полиномиальную кривую, проявляется ее главный максимум на интервале 0–50 мкм, большая часть углерода сосредоточена в тонких фракциях твердой фазы. Данная закономерность является известной, подтвержденной исследованиями структуры почвенно-поглощающего комплекса почв (Муромцев, Мажайский, Семенов, 2011), свежего аллювия (Лазаренко, 1964; Asselman, Middelkoop, 1995; Cotton, Wharton, Bass et al., 2006), эпифитовзвеси (Steiger, Gurnell, Petts, 2001; Goldschneider, Haralampides, MacQuarrie, 2007; Янин, 2020) и донных отложений приморских озер (Вахрамеева, Лосюк, 2021). В донных отложениях водоемов, испытывающих промышленную и рекреационную нагрузку, $C_{общ}$ в явном виде является интегральным показателем. Под ним подразумевают сочетание углистых частиц, почвенных микроагрегатов, водорослей, сапропеля затонов, фекальных частиц и многих других компонентов. Их накопление напрямую влияет на ряд гигиенических параметров природных вод, таких как запах, плавающие примеси, мутность, химическое и биохимическое потребление O_2, и на условия развития патогенных микроорганизмов (Щеголькова, Веницианов, Звезденкова и др., 2016). В некоторых действующих стандартах (СанПиН 2.1.7.573-96, 1997) параметр $C_{общ}$ (пересчет на сухой продукт) непосредственно входит в перечень нормативных показателей, например, при контроле состава сточных осадков, которые на 50–90% могут состоять из органического вещества.

Полученные фактические данные о скорости пойменного осадконакопления, хотя и предоставили ценную геоморфологическую информацию, актуализировали междисциплинарные проблемы, которые на региональном уровне остаются далекими от разрешения. В первую очередь речь идет о пространственном анализе аккумуляции аллювия на берегах Оки и на ее пойме, для которого необходима основа в форме хотя бы среднемасштабных цифровых моделей рельефа. Выявление участков прирусловой, центральной и притеррасной поймы, в наибольшей степени уязвимых к техногенным загрязнениям, может быть осуществлено за счет совмещения стационарного мониторинга рельефообразования, методов геодезии, геохимии и наблюдений за гидрологическими элементами речного стока. В Рязанском расширении Ока – умеренно загрязненная река. На этом фоне естественно стремление интерпретировать тренды аллювиального процесса с геоэкологических позиций. Вместе с тем состав наносов (будущих почвогрунтов aIVp), скорость обновления поверхности поймы, соотно-

шение минеральной и органической составляющих наилка позволяют объяснить многие гидролого-геоморфологические особенности эволюции пойменного рельефа. Разработка специфических литологических проблем не теряет актуальности на современном этапе неустойчивого стока реки, когда прогноз развития территорий в супераквальных ландшафтных позициях становится неординарной задачей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Семилетний полевой мониторинг аккумуляции аллювия свидетельствует о четко выраженной границе между прирусловой и центральной поймой, пролегающей примерно в 50 м от меженного русла Оки. Литология свежих наносов в границах участков, примыкающих к водоему, отличается повышенной среднегодовой мощностью слоев (17 мм) и средним диаметром частиц 0.12 мм. Несмотря на пространственно-временные различия седиментационной обстановки, наиболее подвижными на окских берегах повсеместно были частицы мелкого и среднего песка. За 60–70 лет, прошедших со времен литологических исследований Е.В. Шанцера и А.А. Лазаренко на р. Оке в ее среднем течении (Лазаренко, 1964), средневзвешенный (за несколько лет) гранулометрический состав отмелей существенно не изменился.

Современные климатические изменения документируются в атипичных для XX в. литологических записях, примером которых являются отложения 2014 и 2019 гг. Для данных сезонов удалось зафиксировать накопление маломощных пылевато-глинистых наилков вместо обычных слоев песков и супесей толщиной в первые сантиметры. Низкие весенние половодья, прошедшие в эти годы, имели обеспеченность по уровням >95% за 145 лет наблюдений водного режима Оки. Снижение весеннего стока повышает экологические риски, что отражается в высокой поглотительной способности пылевато-глинистого наилка, относительно обогащенного органическим веществом. Тем не менее три четверти всех проб аллювия, изъятых с седиментационных ловушек низкой поймы в 2014–2021 гг., представляли собой минеральные грунты ($C_{общ}$ < 3%). В 2021 г. кумулятивное действие затопления пойменных карьеров, эрозии подмываемых берегов и оживления бассейнового массопереноса привело к резкому повышению скорости аккумуляции на прирусловых участках (в 2–35 раз больше, чем в предыдущие годы). Ввиду прогрессирующего разрушения естественного рельефа в строительных целях содержание углерода на отдельных позициях низкой и высокой поймы в последнем году мониторинга увеличилось до 5–6%.

На высокую пойму доставляются только взвешенные наносы, при этом в понижениях рельефа осадконакопление идет на 80–600% интенсивнее, чем на кратко- и среднепоемных гривах и валах. Средняя крупность взвешенных наносов на высокой пойме в 2.5 раза меньше ожидаемой для р. Оки, но в абсолютных значениях отличия невелики (0.025 мм против 0.08 мм) и объясняются удалением учетных площадок от русла, в котором в толщу воды вмываются и песчаные частицы. Среднее время пребывания дневной поверхности под водой на позициях высокой поймы составляет 15 дней, что, по классификации В.И. Шрага, соответствует средней поемности. В целом прогноз тенденций заполнения пойменных аккумулирующих емкостей может опираться на классификацию их положения и морфометрический анализ местности. Полученная нами информация позволяет пока лишь уточнить общие оценки параметров осадконакопления. Более сложный анализ, вероятно, будет основываться на спутниковых и топографических данных, полезная информация из которых на предварительном этапе уже использована нами в настоящей работе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 22-77-00050.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александровский А.Л., Гласко М.П. Взаимодействие аллювиальных и почвообразовательных процессов на разных этапах формирования пойм равнинных рек в голоцене (на примере рек центральной части Восточно-Европейской равнины) // Геоморфология. 2014. № 4. С. 3–17.

Алексеевский Н.И., Белозерова Е.В., Чалов С.Р. Седиментационная ловушка. Описание полезной модели к патенту. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2012. 10 с.

Барышников Н.Б. Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. СПб.: РГГМУ. 2012. 426 с.

Вахрамеева Е.А., Лосюк Г.Н. Распределение органического вещества в донных отложениях меромиктического озера Трехцветное (Кандалакшский залив Белого моря) // «География: развитие науки и образования». Междунар. науч.-практ. конф. XXIV Герценовские чтения. 2021. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена. С. 290–293.

Воробьев А.Ю. Поемность локальных морфологических комплексов поймы реки Оки: опыт

определения по результатам геоинформационного анализа конфигурации зоны затопления // Вест. Рязан. гос. ун-та им. С.А. Есенина. 2021. № 1 (70). С. 163–171.

Воробьев А.Ю., Кадыров А.С. Аккумуляция аллювиальных отложений в прирусловых поймах // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 3 (78). С. 17–27.

Воробьев А.Ю., Кривцов В.А., Кадыров А.С. Современная динамика накопления и состав аллювия прирусловой поймы реки Оки // Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2021. Т. 163, кн. 4. С. 603–625.

Гласко М.П., Фоломеев Б.А. Методика определения скоростей накопления пойменного аллювия равнинных рек по археолого-геоморфологическим данным (на примере средней Оки) // Геоморфология. 1981. № 3. С. 26–36.

Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ. 2019. 23 с.

ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ. 2021. 11 с.

Зайдельман Ф.Р., Беличенко М.В., Бибин А.С. Деградация и восстановление почв поймы р. Москва за последние 50 лет // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1377–1386.

Кононов М.С., Пановская М.З. Состав аллювиальных наносов и почв Дединовского расширения Окской поймы // Почвоведение. 1973. № 11. С. 18–26.

Коробкин В.И., Передельский Л.В. Инженерная геология и охрана окружающей среды. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та. 2013. 348 с.

Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки) / Тр. ГИН. Вып. 120. 1964. 236 с.

Мартынов А.В. Содержание подвижных форм микроэлементов в аллювиальных почвах поймы среднего течения р. Амур и влияние на них паводка 2013 года // Вест. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. 2019. № 2. С. 32–39.

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 376–396.

Муромцев Н.А., Мажайский Ю.А., Семенов Н.А., Лыткин И.И., Шуравилин А.В., Томин Ю.А. Почвы долин рек Оки и Угры и их продуктивность. Рязань: РГАТУ им. профессора П.А. Костычева. 2011. 203 с.

Опекунов А.Ю., Митрофанова Е.С., Опекунова М.Г. Техногенная трансформация состава донных отложений рек и каналов Санкт-Петербурга // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. № 4. С. 48–61.

Палатов Д.М., Новичкова А.А., Быков А.Д. Результаты гидробиологических исследований в среднем течении р. Оки // Тр. Окского заповедника. 2019. № 38. С. 267–292.

СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения». М.: Информ.-издат. центр Минздрава России. 1997. 29 с.

Симонов Ю.Г. Геоморфология. Методология фундаментальных исследований. СПб.: Питер. 2005. 427 с.

Фингерт Е.А., Крыленко И.Н., Головлев П.П., Алабян А.М. Влияние инфраструктуры на характеристики затопления пойм (на примере р. Ока в среднем течении) // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. СПб.: Изд-во СПбГУ. 2018. С. 944–948.

Чалов С.Р., Ефимов В.А. Гранулометрический состав взвешенных наносов: характеристики, классификации, пространственная изменчивость // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 4. С. 91–103.

Чеснокова С.М., Савельев О.В., Злывко А.С., Шаров А.Ю., Сережина К.В. Оценка уровня загрязнения донных отложений малых рек Владимирской области // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2013. Т. 15. № 3–6. С. 1993–1996.

Шишов С.А. Аллювиальные темногумусовые почвы Окской поймы в районе села Дединово, их агроэкологические свойства и динамика почвенных процессов // Проблемы почвоведения. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 2006. С. 174–198.

Щеголькова Н.М., Веницианов Е.В., Звезденкова Г.А., Скрипчинский А.К., Рыбка К.Ю. Многолетняя динамика процессов самоочищения как интегральный показатель для выбора управляющих воздействий (на примере реки Москвы) // Водное хозяйство России. 2016. № 4. С. 103–117.

Эрозионно-русловые системы / Под ред. Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука. М.: ИНФРА-М. 2017. 702 с.

Янин Е.П. Геохимия речной эпифитовзвеси в зоне влияния промышленного города. М.: АРСО, 2020. 139 с.

Яхт-клуб «Маяк». Официальный сайт. https://mayak-62.ru. Дата обращения: 08.01.2024.

Allan J.D., Callisto M.M. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters, 2nd Edition. Chapman and Hall, New York. 2007. 450 p.

Asselman N.E.M., Middelkoop H. Floodplain sedimentation: Quantities, patterns and processes // Earth Surface Processes and Landforms. 1995. Vol. 20. P. 481-499.

Ciszewski D., Czajka A. Human-induced sedimentation patterns of a channelized lowland river // Earth Surface Processes and Landforms. 2015. Vol. 40. Iss. 6. P. 783-795.

Charlton R. Fundamentals of fluvial geomorphology. London: Routledge. 2008. 234 p.

Cotton J.A., Wharton G., Bass J.A.B., Heppell C.M., Wotton R.S. The effects of seasonal changes to in-stream vegetation cover on patterns of flow and accumulation of sediment // Geomorphology. 2006. Vol. 77. Iss. 3–4. P. 320-334.

Draut A.E., Ritchie A.C. Sedimentology of New Fluvial Deposits on the Elwha River, Washington, USA, Formed During Large-Scale Dam Removal // River research and Applications. 2015. Vol. 31. P. 42-61.

Goldschneider A.A., Haralampides K.A., MacQuarrie K.T.B. River sediment and flow characteristics near a bank filtration water supply: Implications for riverbed clogging // Journal of Hydrology. 2007. Vol. 344. Iss. 1–2. P. 55-69.

Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R. Sedymentologia: Wydawnictwa Geologiczne. Warszawa. 1976. 653 p.

Hupp C. R., Shenk E. R., Kroes D. E., Willard D. A, Townsend P. A., Peet R. K. Patterns of floodplain sediment deposition along the regulated lower Roanoke River, North Carolina: Annual, decadal, centennial scales // Geomorphology. 2015. Vol. 228. P. 666-680.

Harris T., Richards K.S. Design and calibration of a recording bedload trap // Earth Surface Processes and Landforms. 1995. Vol. 20. P. 711-720.

Nanson G.C., Croke J.C. A genetic classification of floodplains // Geomorphology. 1992. Vol. 4. Iss. 6. P. 459-486.

Oldfield F., Hao Q., Bloemendal J., Gibbs-Eggar Z., Patil S., Guo Z. Links between bulk sediment particle size and magnetic grain-size: general observations and implications for Chinese loess studies // Sedimentology. 2009. Vol. 56. P. 2091-2106.

Phillips J.M., Walling D.E. The particle size characteristics of fine-grained channel deposits in the River Exe Basin, Devon, UK // Hydrological Processes. 1999. Vol. 13. Iss. 1. P. 1-19.

Steiger J., Gurnell A.M., Petts G.E. Sediment deposition along the channel margins of a reach of the middle River Severn, UK // River Research and Applications. 2001. Vol. 17. Issue4-5. Special Issue: Eighth International Symposium on Regulated Streams. P. 443-460.

Voss J.C. Deposition Patterns and Rates of Mining-Contaminated Sediment within a Sedimentation Basin System, S.E. Missouri". MSU Graduate Theses. 2017. 3074.

Zhao R., Coles N.A., Wu J. Status of heavy metals in soils following long-term river sediment application in plain river network region, southern China // Journal of Soils and Sediments. 2015. Vol. 15. P. 2285–2292.

ОБ АВТОРАХ

Воробьев Алексей Юрьевич, доцент кафедры географии, экологии и туризма, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», кандидат географических наук, тел. 89511011707, a.vorobyov90@mail.ru, ORCID:
https://orcid.org/0000-0002-7110-4232.

Кривцов Вячеслав Андреевич, профессор, профессор кафедры географии, экологии и туризма, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», доктор географических наук, v.krivtsov@rzn-rsu.ru.

Водорезов Алексей Владимирович, доцент, заведующий кафедрой географии, экологии и туризма, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», кандидат географических наук, a.vodorezov@rzn-rsu.ru.

Варнаков Алексей Николаевич, доцент кафедры географии, экологии и туризма, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», кандидат технических наук, a.varnakov@rzn-rsu.ru.

Кадыров Александр Сергеевич, аспирант, лаборант кафедры географии, экологии и туризма, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», alieksandr.kadyrov93@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1416-7898.

FIELD MONITORING OF ALLUVIAL SEDIMENT ACCUMULATION IN THE OKA RIVER FLOODPLAIN (IN THE MIDDLE PART OF THE ITS BASIN)

A.Y. Vorobyov, V.A. Krivtsov, A.V. Vodorezov, A.N. Varnakov, A.S. Kadyrov

Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Ryazan, Russia

Abstract. We present the results of using the method of sedimentation traps (mats) in geomorphological monitoring of alluvial sedimentation rates in the floodplain of the Oka River. Only two spring floods between 2014 and 2021 inundated the central (high) floodplain, resulting in the accumulation of a 0.45 mm layer of sediments. We observed sedimentation on the low floodplain annually. The average thickness of the mineral (according to National Standard 25100-2020) sediment layer on the mats reaches 19.8 mm/year. Only silty-clay sediments are transported far from the Oka River channel, and accumulation of sandy particles was noted in the river channel zone. We determined that the high floodplain at the monitoring points is inundated typically within 15 days, which corresponds to an average flood according to the V.I. Shrag's gradation. In riverine areas, the direct interaction between stream water masses and bank soils can extend for 1–6 months and is highly dependent on the type of spring and flood parameters. This allows us to identify such sedimentation settings as areas with regular manifestation of fluvial morpholithogenesis, sensitive to fluctuations in the climate of the Oka basin.

Keywords: Oka River, floodplain, sediment trap, spring flood, alluvium, granulometric analysis, organic carbon

ACKNOWLEDGMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, Project no. 22-77-00050.

REFERENCES

Allan J.D., Callisto M.M. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters, 2nd Edition. Chapman and Hall, New York. 2007. 450 p.

Alexandrovskiy A.L., Glasko M.P. Interaction of alluvial and soil-forming processes at different stages of formation of floodplains of plain rivers in the Holocene (on the example of rivers in the central part of the East European Plain) // Geomorfologija. 2014. № 4. C. 3-17. (In Russ.)

Alekseevskiy N.I., Belozerova E.V., Chalov S.R. Sedimentation trap. Description of useful model to the patent. Moscow: Federal Service for Intellectual Property. 2012. 10 p. (In Russ.)

Asselman N.E.M., Middelkoop H. Floodplain sedimentation: Quantities, patterns and processes // Earth Surface Processes and Landforms. 1995. Vol. 20. P. 481-499.

Baryshnikov N.B. Problems of morphology, hydrology and hydraulics of floodplains. SPb.: RGGMU. 2012. 426 p. (In Russ.)

Catchment erosional-fluvial systems / pod red. R.S. Chalova, V.N. Golosova, A.Ju. Sidorchuka. M.: INFRA-M. 2017. 702 p. (In Russ.)

Ciszewski D., Czajka A. Human-induced sedimentation patterns of a channelized lowland river // Earth Surface Processes and Landforms. 2015. Vol. 40. Iss. 6. P. 783–795.

Chalov S.R., Efimov V.A. Granulometric composition of suspended sediments: characteristics, classifications, spatial variability // Lomonosov Geography Journal. 2021. № 4. C. 91–103. (In Russ.)

Charlton R. Fundamentals of fluvial geomorphology. London: Routledge. 2008. 234 p.

Chesnokova S.M., Savelyev O.V., Zlyvko A.S., Sharov A.Yu., Serezhina K.V. Assessment of the level of pollution of bottom sediments of small rivers in the Vladimir region // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2013. Book 15. № 3–6. P. 1993-1996. (In Russ.)

Cotton J.A., Wharton G., Bass J.A.B., Heppell C.M., Wotton R.S. The effects of seasonal changes to in-stream vegetation cover on patterns of flow and accumulation of sediment // Geomorphology. 2006. Vol. 77. Iss. 3–4. P. 320-334.

Draut A.E., Ritchie A.C. Sedimentology of New Fluvial Deposits on the Elwha River, Washington, USA, Formed During Large-Scale Dam Removal // River research and Applications. 2015. Vol. 31. P. 42–61.

Fingert E.A., Krylenko I.N., Golovlev P.P., Alabyan A.M. Infrastructure influence on the characteristics of floodplain inundation (on the example of the Oka River in the middle reaches) // Third Vinogradov Readings. Frontiers of hydrology. SPb.: Izd-vo SPbSU. 2018. P. 944–948. (In Russ.)

Glasko M.P., Folomeev B.A. Methodology for determining the accumulation rates of floodplain alluvium of plain rivers by archaeological and geomorphological data (on the example of the middle Oka) // Geomorfologija. 1981. № 3. C. 26–36. (In Russ.)

Goldschneider A.A., Haralampides K.A., MacQuarrie K.T.B. River sediment and flow characteristics near a bank filtration water supply: Implications for riverbed clogging // Journal of Hydrology. 2007. Vol. 344. Iss. 1–2. P. 55-69.

Gorbarenko A.V., Varencova N.A., Kireeva M.B. Transformatsiya stoka vesennyi polovod'ja i pavodkov v basseyne verhnaya Volga pod vliianiem klimaticheskih izmenenenii (in Russian) // Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie. 2021. № 4. P. 6–28. (In Russ.)

Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R. Sedymentologia: Wydawnictwa Geologiczne. Warszawa. 1976. 653 p.

Harris T., Richards K.S. Design and calibration of a recording bedload trap // Earth Surface Processes and Landforms. 1995. Vol. 20. P. 711–720.

Hupp C. R., Shenk E. R., Kroes D. E., Willard D. A, Townsend P. A., Peet R. K. Patterns of floodplain sediment deposition along the regulated lower Roanoke River, North Carolina: Annual, decadal, centennial scales // Geomorphology. 2015. Vol. 228. P. 666–680.

Kononov M.S., Panovskaya M.Z. Composition of alluvial sediments and soils of the Dedinovsky Oka floodplain // Eurasian Soil Science. 1973. № 11. P. 18-26. (In Russ.)

Korobkin V.I., Peredel'skij L.V. Engineering geology and environmental protection. Rostov-na-Donu: Izd-vo Rostov. un-ta. 2013. 348 p. (In Russ.)

Lazarenko A.A. Lithology of alluvium of plain rivers of humid zone (on the example of Dnieper, Desna, Oka). Trudy GIN. Vyp. 120. 1964. 236 p. (In Russ.)

Martynov A.V. Content of mobile forms of trace elements in alluvial soils of the floodplain of the middle reaches of the Amur River and the impact of the flood of 2013 on them // Vest. Voronezh. gos. un-ta. Ser. Geografija. Geojekologija. 2019. № 2. P. 32–39. (In Russ.)

Mokhov I.I. Russian climatic research in 2015-2018 // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. Book 56. № 4. P. 376–396.

Muromtsev N.A., Mazhaisky Y.A., Semyonov N.A., Lytkin I.I., Shuravilin A.V., Tomin Y.A. Soils of the Oka and Ugra river valleys and their productivity. Ryazan: RSATU named after Professor P.A. Kostychev. 2011. 203 p.

Nanson G.C., Croke J.C. A genetic classification of floodplains // Geomorphology. 1992. Vol. 4. Iss. 6. P. 459–486.

National standart 12536-2014. Soils. Methods of laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition. Interstate standard. Moscow: Standardinform. 2019. 23 p. (In Russ.)

National standart 26213-2021. Soils. Methods for determination of organic matter. Interstate standard. Moscow: Standardinform. 2021. 11 p. (In Russ.)

Oldfield F., Hao Q., Bloemendal J., Gibbs-Eggar Z., Patil S., Guo Z. Links between bulk sediment particle size and magnetic grain-size: general observations and implications for Chinese loess studies // Sedimentology. 2009. Vol. 56. P. 2091-2106.

Opekunov A.Yu., Mitrofanova E.S., Opekunova M.G. Technogenic transformation of the composition of bottom sediments of rivers and canals of St. Petersburg // Geojekologija. Inzhenernaja geologija. Gidrogeologija. Geokriologija. 2017. № 4. P. 48–61. (In Russ.)

Palatov D.M., Novichkova A.A., Bykov A.D. Results of hydrobiological studies in the middle reaches of the Oka River // Trudy Okskogo zapovednika. 2019. № 38. P. 267–292. (In Russ.)

Phillips J.M., Walling D.E. The particle size characteristics of fine-grained channel deposits in the River Exe Basin, Devon, UK // Hydrological Processes. 1999. Vol. 13. Iss. 1. P. 1–19.

Sanitary rules and standards 2.1.7.573-96 'Hygienic requirements for the use of wastewater and its sludge for irrigation and fertilisation'. M.: Inform.-edat. centre of the Ministry of Health of Russia. 1997. 29 p.

Simonov Ju.G. Methodology of fundamental research. SPb.: Piter. 2005. 427 p. (In Russ.)

Shchegolkova N.M., Venitsianov E.V., Zvezdenkova G.A., Skripchinskiy A.K., Rybka K.Y. Multiyear dynamics of self-purification processes as an integral indicator for selecting control actions (by the example of the Moscow River) // Vodnoe hozjajstvo Rossii. 2016. № 4. P. 103–117. (In Russ.)

Shishov S.A. Alluvial black humus soils of the Oka River floodplain in the area of Dedinovo village, their agroecological properties and dynamics of soil processes // Problems of Soil Science. M.: Soil Institute named after V.V. Gubkin. V.V. Dokuchaev. 2006. P. 174–198. (In Russ.)

Steiger J., Gurnell A.M., Petts G.E. Sediment deposition along the channel margins of a reach of the middle River Severn, UK // River Research and Applications. 2001. Vol. 17. Issue4-5. Special Issue: Eighth International Symposium on Regulated Streams. P. 443–460.

Vakhrameeva E.A., Losyuk G.N. Distribution of organic matter in the bottom sediments of the meromictic lake Trekhtsvetnoe (Kandalaksha Bay of the White Sea) // Geography: development of science and education'. International Scientific and Practical Conf. XXIV Herzen Readings. 2021. SPb.: A.I. Herzen Russian State Pedagogical University. C. 290–293. (In Russ.)

Voss J. C. Deposition Patterns and Rates of Mining-Contaminated Sediment within a Sedimentation Basin System, S.E. Missouri". MSU Graduate Theses. 2017. 3074.

Vorobyev A.Yu. Floodability of local morphological complexes of the Oka River floodplain: experience in determining the flood zone configuration based on the results of geoinformation analysis // Vest. Rjazan. gos. un-ta im. S.A. Esenina. 2021. № 1 (70). P. 163–171. (In Russ.)

Vorobyev A.Yu., Kadyrov A.S. Accumulation of alluvial sediments in riverine floodplains // Geologija, geografija i global'naja jenergija. 2020. № 3 (78). P. 17–27. (In Russ.)

Vorob'ev A.Ju., Krivcov V.A., Kadyrov A.S. Current dynamics of accumulation and composition of alluvium in the near-channel floodplain of the Oka river (Russia) // Uch. zap. Kazan. un-ta. Ser. estestv. nauki. 2021. T. 163. kn. 4. P. 603–625. (In Russ.)

Yacht Club 'Lighthouse'. [Electronic data]. Access way: https://mayak-62.ru. (access date: 08.01.2024).

Yanin E.P. Geochemistry of river epiphytic suspension in the zone of influence of an industrial city. M.: ARSO, 2020. 139 p. (In Russ.)

Zaidelman F.R., Belichenko M.V., Bibin A.S. Degradation and restoration of soils of the Moscow River floodplain for the last 50 years // Eurasian Soil Science. 2013. № 11. P. 1377–1386. (In Russ.)

Zhao R., Coles N.A., Wu J. Status of heavy metals in soils following long-term river sediment application in plain river network region, southern China // Journal of Soils and Sediments. 2015. Vol. 15. P. 2285–2292.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey Y. Vorobyov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Geography, Ecology, and Tourism, "Ryazan State University named after S.A. Yesenin", Candidate of Geographical Sciences, a.vorobyov90@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7110-4232.

Vyacheslav A. Krivtsov, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Full Professor of the Department of Geography, Ecology and Tourism, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State University named after S.A. Yesenin", v.krivtsov@rzn-rsu.ru.

Alexey V. Vodorezov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Geography, Ecology and Tourism, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State University named after S.A. Yesenin", a.vodorezov@rzn-rsu.ru.

Alexey N. Varnakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Geography, Ecology and Tourism, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State University named after S.A. Yesenin", a.varnakov@rzn-rsu.ru.

Aleksandr S. Kadyrov, post-graduate student, assistant, Department of Geography, Ecology, and Tourism, "Ryazan State University named after S.A. Yesenin", alieksandr.kadyrov93@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1416-7898.

УДК 504.5

INFLUENCING FACTORS OF HEAVY METALS IN THE COASTAL AREAS OF YANGTZE RIVER ESTUARY

Sha Lou[1,2], Yuwen Zou[1], Shuguang Liu[1,2], Guihui Zhong[1], Zhirui Zhang[1]

[1]College of Civil Engineering, Tongji University;
[2]Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University; Shanghai, China

Received 27.01.2025
Received in revised form 20.05.2025
Accepted 10.06.2025

Abstract: This study investigates the distribution and influencing factors of six heavy metals (Cr, Zn, Ni, Cu, Pb, Cd) in water and sediments from the coastal areas of the Yangtze River estuary. Field surveys at seven sites revealed that heavy metal concentrations are significantly affected by physicochemical parameters such as temperature, pH, redox potential, salinity, and conductivity. Strong correlations among Cu, Cr, and Ni suggest common sources or pathways. The findings provide insights into heavy metal behavior in estuarine environments and offer technical support for pollution control and water quality management.

Keywords: Heavy metals; physicochemical parameters of water quality; coastal areas; Yangtze River Estuary

DOI: 10.71367/3034-4638-2025-2-2-51-57

INTRODUCTION

With the rapid development of urbanization and industrialization in the coastal zone, pollution accumulates in aquatic environments, especially in the estuaries due to the discharge of runoff (Gao and Chen, 2012; Ghosh and Maiti, 2018; Jiang et al., 2017). Heavy metals are one of the major pollutants in aquatic environments characterized by degradation-resistant and strong toxicity. After entering the estuaries ecosystem, they accumulate in the sediment mainly through adsorption, precipitation or flocculation, which makes sediment a major sink for heavy metals (Li et al., 2023; Zahra et al., 2014). Under certain conditions, heavy metals could be released from sediment and re-enter into the water making sediment the potential sources of heavy metals in the aquatic environment. The exchanges of heavy metals at the interface of sediment and water not only pose a threat to the health of the ecosystem, but also endanger human health through the food chain and drinking water (Liu et al., 2018; Xie et al., 2021).The study region is part of the coastal areas of the Yangtze River estuary (CAYRE), which is an important area for human production, as well as an ecologically fragile area. It is strongly influenced by sea-land interactions and human activities. On the one hand, in the CAYRE, freshwater and seawater mix, the flow field is complex and influenced by runoff, tide, and wave, which affects the transport process of heavy metals and other substances. On the other hand, intensive human activities occur in the CAYRE. The ports, petrochemical industries, steel plants and shipyards, etc., generate a large amount of industrial wastewater and urban sewage, which affects the water environment in the CAYRE. The industrial and agricultural activities along the Yangtze River are also very intense, and lots of domestic and industrial wastewater is brought into the Yangtze River through outfalls (e.g., the Wusongkou sewage outfall and the South District sewage outfall) and the runoffs such as the Huangpu River. The annual discharge of heavy metals from the Yangtze River estuary into the sea ranges from 20,000 to 30,000 tons. Therefore, figuring out distributions of heavy metal concentrations in the water environment and their behaviors is essential for environmental management and health protection of the Yangtze River estuary region (Li et al., 2021).

According to previous studies, both anthropogenic activities such as industrial wastewater, mining development, domestic sewage, agricultural production, and traffic pollution (Liang et al., 2023; Liu et al., 2018;

Su et al., 2023) and natural processes such as soil erosion, vegetation growth, and rock decomposition, have a great impact on heavy metal concentrations in water environment (Kang et al., 2019; Zhang, 2006), especially that the physicochemical parameters of water quality such as temperature, pH, salinity, suspended sediment concentration, etc. greatly affect the migration and transformation processes of heavy metals (Apau et al., 2022; Attah et al., 2021; Hu et al., 2021a). It has been found that the release process of heavy metals from sediment into water was increased with pH < 7, while the adsorption and precipitation of heavy metals by sediments was enhanced with pH > 7 (Kang et al., 2019; Wang et al., 2018b), and dissolved oxygen in water allows more heavy metals to be bound (Atkinson et al., 2007). The relationship between heavy metal concentrations and physicochemical parameters of water quality was proved. However, the mechanism between them was still not clearly revealed (Ravisankar et al., 2019).

In this paper, through the field observations at seven sampling sites along the coastal areas of the Yangtze River estuary, the six heavy metals (Cr, Zn, Ni, Cu, Pb, and Cd) in sediment and water were analyzed. Spearman correlation analysis and multiple linear regression were used together to qualitatively describe the linear relationships between heavy metal concentrations and physicochemical parameters of water quality, through which the key factors affecting the concentration of heavy metals can be revealed. The method proposed in this paper can be easily applied to heavy metal prevention and control in estuaries, which can also provide valuable information and technical support for water environment protection in similar areas.

MATERIALS AND METHODS

Field observations

Four times of field surveys were conducted on July 14th, September 22nd, November 29th in 2021 and January 15th in 2022 to analyze heavy metal concentrations and physicochemical parameters of water quality at seven sampling sites (Fig. 1). From northwest to southeast along the coastline, seven sampling stations are LiuHeKou (LHK), ShiDongKou (SDK), WuSongKou (WSK), ZhuYuan (ZY), SanJiaGang (SJG), ChaoYangNongChang (CYNC) and DaZhiHe (DZH). These sampling points are distributed along the Yangtze River estuary and can reflect changes in heavy metal concentrations with geographical locations in the Yangtze River estuary area.

Six heavy metals (Cr, Zn, Ni, Cu, Pb, and Cd) were analyzed based on the sediment and water samplings. Water samples were collected in middle layer of the water column using a 2.5L Plexiglas water sampler. The water samples were conserved by high-density polyethylene (HDPE) containers, which were rinsed with nitric acid and cleaned with Milli-Q water prior to sampling. Sediment samples of surface sediment (0–5 cm) were collected by plastic shovel, and sealed in a polypropylene bag. Three water samples were collected as parallel samples at each sampling site. The collected sediment and water samples were transported to the laboratory in boxes with ice packs for testing as soon as possible, and all samples were stored at 4 °C before further analysis.

At each site, multifunctional water quality monitor (AP5000, Aqueous) was used to record the physicochemical parameters of water quality on site, including Temperature (Temp), pH, Oxygen redox potential (ORP), Dissolved oxygen (DO), Electrical conductivity (EC), Electrical resistivity (RES), Total dissolved solids (TDS), Salinity (SAL), Cyanobacteria (BGA-PE), and turbidity (NTU). A portable turbidimeter (2100Q, HACH, USA) and a portable pH meter (FiveGo F2-Field Kit, METTLER TOLEDO, Switzerland) were adopted to monitor the turbidity and pH at the same time to verify the validity of data.

Heavy metal concentrations tests

In the pretreatment procedure, the sediment samples were thawed at ambient temperature. Subsequently, a portion of the sample was extracted using a sampling spoon and subjected to drying in a constant temperature blast dryer. The samples dried were ground with a mortar and pestle, and sieved with a 63 μm nylon mesh sieve and subsequently placed in sealed bags for measurement. The collected water samples were promptly filtered through a 0.45 μm microporous membrane using a vacuum extraction device to scrape the suspended particles. The obtained suspended sediment samples were dried in a drying oven, ground uniformly and then bagged for analysis of particulate heavy metals. The filtered water samples were put into clean 50 ml polyethylene bottles, and 2 drops of 10 % HNO_3 were added to inhibit the activity of microorganisms and placed in the refrigerator at 4 °C for further detection of dissolved heavy metals.

The obtained suspended sediment samples were pretreated and then digested by the acid dissolution method (Janaki-Raman et al., 2007). The experimental steps were as follows: 0.1 g of the homogenized mud sample was weighed accurately in a PTFE digestion vessel, and 6 ml **HCl, 2 ml HNO_3,** 1 ml H_2O_2 and 2 ml of HF were added. The graphite digester was then programmed to perform the digestion: the temperature was ramped up from room temperature to 180 °C for

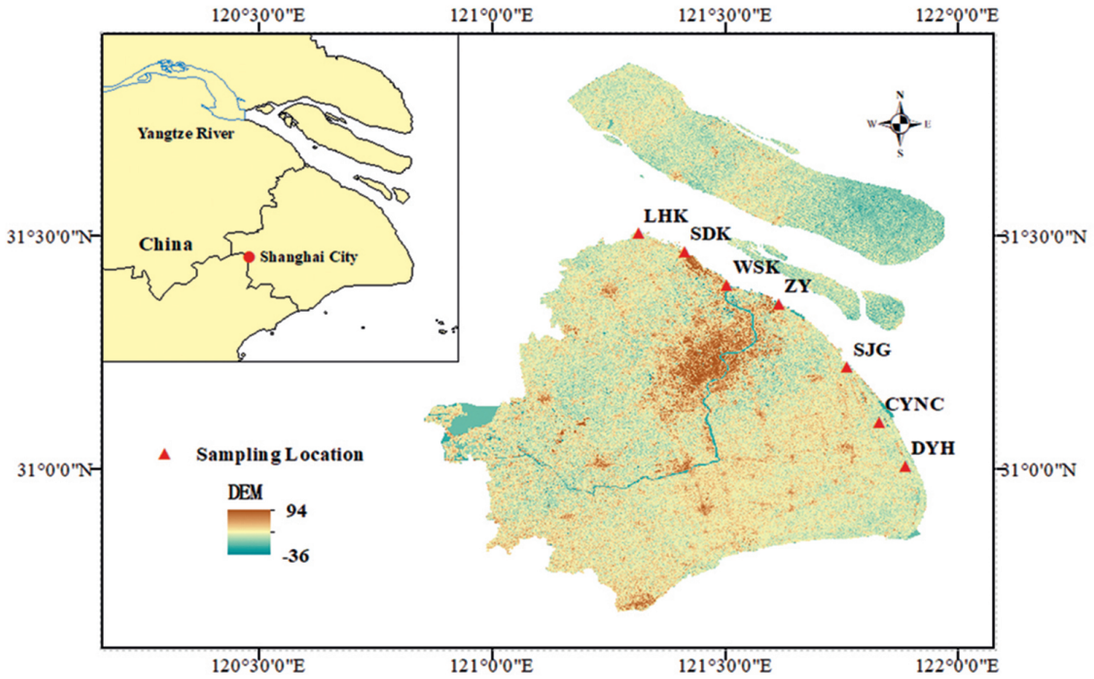


Fig. 1. Study area and sampling stations

30 min and held at 180 °C for 60 min. With the finish of digestion, the sample was placed on the acid catcher until the sediment turned into white crystals. The residue was washed with deionized water and transferred to a centrifuge tube, and placed in the refrigerator to be measured. All samples to be tested were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for the total heavy metal concentrations. To test the reliability of the detection, three parallel sediment and water samples were collected in the vicinity of each sampling site. One sample was randomly selected for five replicate tests during the test of sediment and water samples, and the relative standard deviations of the measured heavy metals (Cu, Zn, Cr, Ni, As, Pb and Cd) were less than 5 %, and the recoveries were in the range of 85 −110 %.

RESULTS AND DISCUSSION

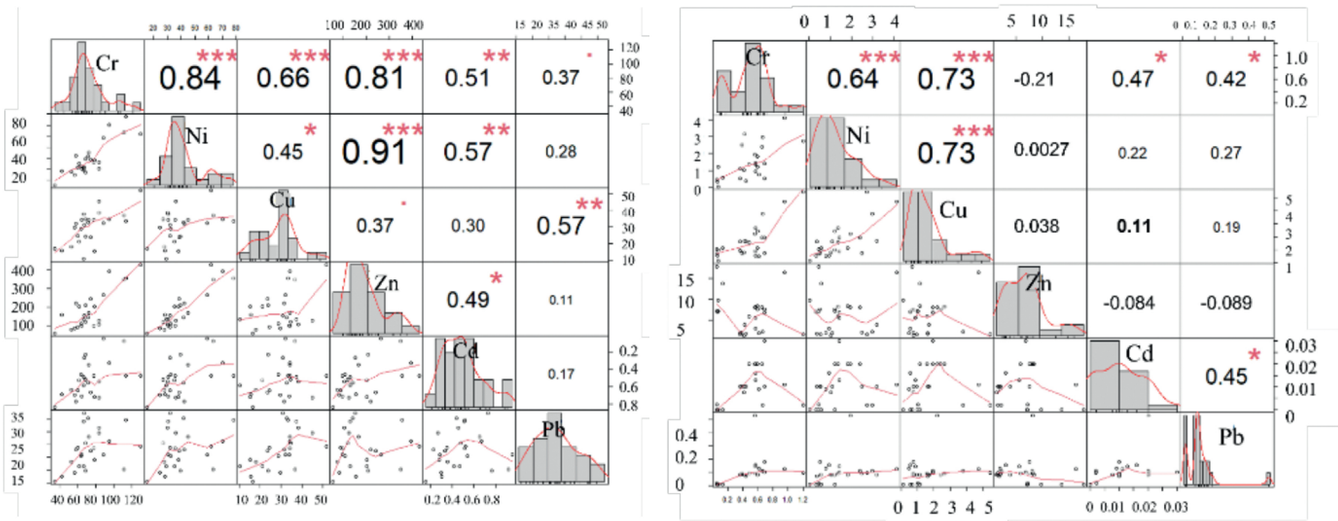
Correlations between heavy metals

Correlations between heavy metals in sediment and water samples were shown in Fig. 2. For sediment samples, Cr concentration was positively correlated to Ni, Cu, Zn and Cd at 0.01 significant level, and to Pb at 0.05 significant level. Ni concentration was positively correlated to Zn and Cd at 0.01 significant level, and to Cu at 0.05 level. Cu concentration was positively correlated to concentrations of Pb at 0.01 significant level and to Zn at 0.05 level. Zn concentration was positively related to Cd at 0.05 significant level. Overall, Cr, Ni, Cu, Cd and Zn were positively related to each other. There were no significant relationships between Pb concentration and most other heavy metals (except Cu).

For water samples, Cr concentration was positively correlated to Ni and Cu at 0.01 significant level, and to Cd and Pb at 0.05 significant level. Ni was positively correlated to Cu at 0.01 significant level. Cd had significant positive correlations with Pb at 0.01 significant level. The positive correlation between heavy metals suggests a potential source or similar environmental pathways for the heavy metals, indicating shared geological, industrial, or anthropogenic influences that contribute to their concurrent presence. Similar to sediment samples, significant correlations were found between Cr, Ni, Cu, which indicates the similar sources of them. Pb and Cd were poorly correlated to other heavy metals but significant relationship was found between them. Zn had no significant correlation with other heavy metals. In sediment and water samples, there is a significant correlation among Cu, Cr, and Ni. However, the correlation between other heavy metal elements varies. Dissolved organic compounds in sediments and microorganisms in the water may influence this process.

Relationships between heavy metal concentrations and physicochemical parameters of water quality

The chemical interactions of heavy metals in sediment and water samples are affected by the physical and chemical properties of water. In order to discuss the linear relationship between the physical and chemical



A B

Fig. 2. Correlation among heavy metal concentrations: A — Sediment samples; B — Water samples

properties of water and the concentration of heavy metals, Spearman correlation analysis and Multiple linear regression were conducted.

Spearman correlation analysis was used to describe the correlations between heavy metal concentrations and physicochemical parameters of water quality (Fig. 3). For sediment samples, most heavy metal concentrations were positively correlated with Temp. The rise in temperature promotes the hydrolysis of fats, sugars, and proteins into small molecules, causing heavy metals to lose their binding sites and be released, which are adsorbed by sludge particles and deposited into sediment. pH was negatively correlated with the concentration of most heavy metals. This was due to the fact that heavy metal ions can form precipitates or complexes with other substances at higher pH values. ORP had positive correlations with most heavy metals. Heavy metals were commonly present in aquatic systems in the form of ions. Cr, Ni, Cd, and Zn ions exhibited high electron transfer capabilities, enabling them to act as effective oxidants in redox reactions. Consequently, the oxidation-reduction potential (ORP) increased with the rising concentration of these heavy metals. Most heavy metals exhibited negative correlations with dissolved oxygen (DO). Heavy metal ions can react with oxygen in the aquatic environment, forming insoluble precipitates, thereby reducing the concentration of DO in water. EC was positively correlated to most heavy metals, while RES was negatively correlated to most heavy metals. When the concentration of heavy metal ions increased, the conductivity of the water also increased accordingly, resulting in an increase in the EC value. The increase in salinity could modify the solubility of heavy metal ions. Certain heavy metal ions were more readily soluble under high salinity conditions, as the increasing salt concentration provided a greater number of ions to stabilize the dissolved state of these ions. There was no significant correlation between most heavy metals and BGA, NTU and Chlorophyll. In general, water quality physicochemical parameters of Temp, PH, ORP, DO, EC, RES, TDS and SAL had relatively stronger influences on heavy metals in sediments.

For water samples, positive correlations between temperature and most heavy metals were observed. As the temperature increases, the solubility of water also increases, which makes it easier for heavy metal ions to dissolve in water, resulting in an increase in concentration. EC was positively correlated to most heavy metals, and RES was negatively correlated to most heavy metals, which were similar to those for sediment sample. TDS and SAL showed positive correlations to most heavy metals. In Yangtze River estuary, most heavy metals in water were in particulate form (Yin et al., 2016). The increase in TDS, EC, and SAL resulted in the enrichment of negative charges on the surface of clay particles (Nieto et al., 2007). The surface charges and deposits were capable of precipitating fine particle-associated heavy metals through adsorption and flocculation reactions, and formed oxides, hydroxides, carbonates and phosphates in the surrounding environment (Sun et al., 2018). Therefore, the concentration of heavy metals in water samples increased. The sedimentation of fine particles was greatly affected by the physicochemical parameters of water quality at salty and fresh water mixing areas (study region in present paper). NTU was negatively correlated with most heavy metals in water. In general, the water quality physicochemical parameters of Temp, pH, ORP, EC, RES, TDS and SAL were more strongly related to heavy metals in water.

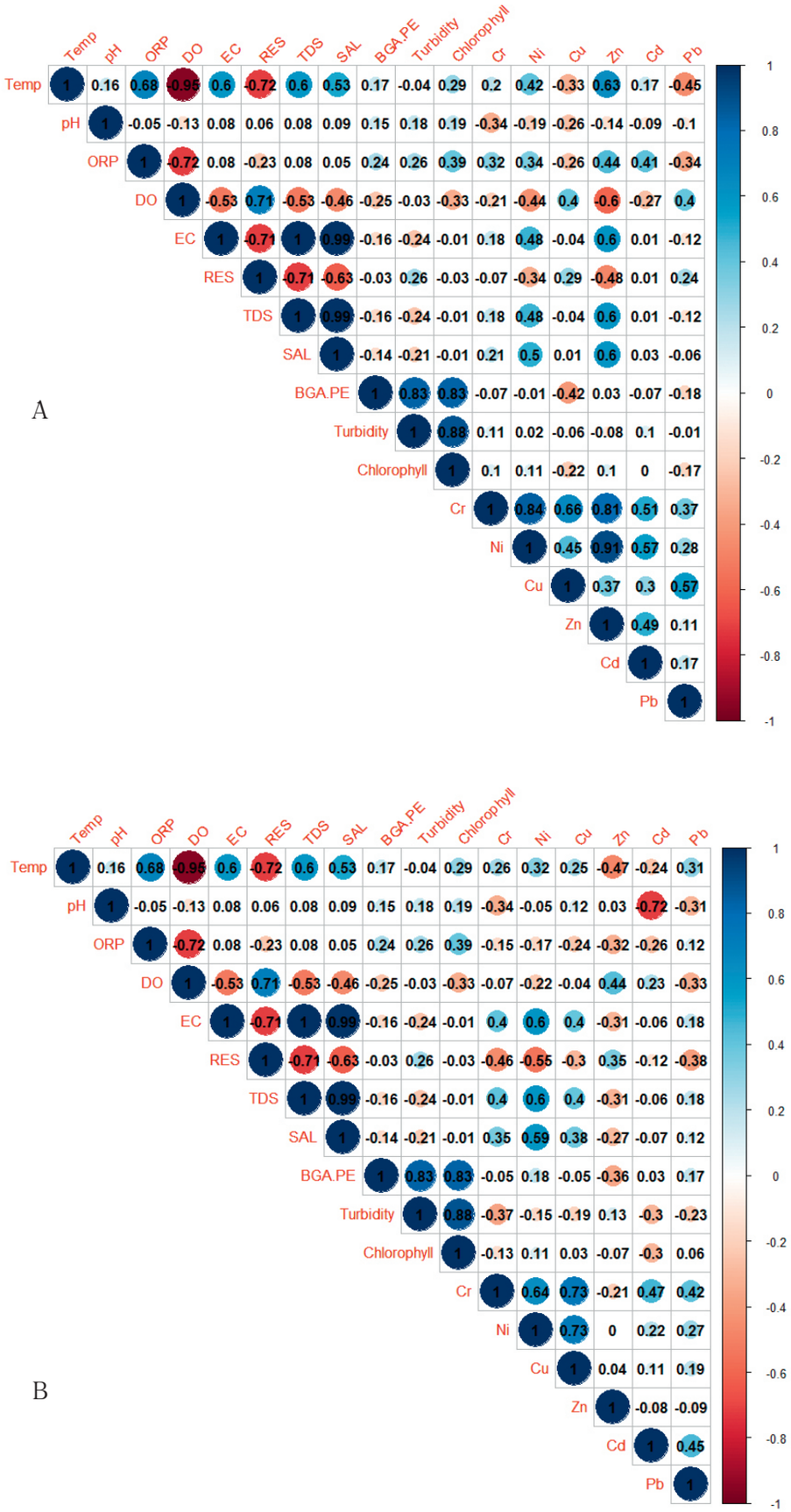


Fig. 3. Spearman correlation analyses between heavy metal concentrations and water quality physicochemical parameters. A — sediment samples; B — water samples

CONCLUSIONS

In this study, six heavy metals were investigated in surface sediment and water samples at seven sampling stations in the Yangtze River estuary. By analyzing the relationship between heavy metal concentrations and physicochemical parameters of water quality, it was found that Temp, pH, ORP, EC, RES, TDS and SAL significantly correlate with heavy metal concentration in sediment samples, and Temp, PH, ORP, DO, EC, RES, TDS and SAL are related to heavy metal concentration in water samples. The results in this study provide significant information and technical support for environmental protection and management in coastal areas of Yangtze River estuary and other similar areas.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was funded by the National Natural Science Foundation of China (42072281, 41602244), Shanghai Innovation Action Plans (22230712900, 22ZR1464200, 20230742500), Top Discipline Plan of Shanghai Universities-Class I (2022-3-YB-03), and Interdisciplinary Project in Ocean Research of Tongji University (2022-2-YB-01).

REFERENCES

Apau, J., Osei-Owusu, J., Yeboah, A., Gyamfi, O., Darko, G., Akoto, O., Dodd, M., 2022. Distribution of heavy metals in sediments, physicochemical and microbial parameters of water from River Subin of Kumasi Metropolis in Ghana. Sci Afr 15, e01074.

Atkinson, C.A., Jolley, D.F., Simpson, S.L.J.C., 2007. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments. 69, 1428–1437.

Attah, U.E., Chinwendu, O.C., Chieze, C.P., Obiahu, O.H., Yan, Z., 2021. Evaluating the spatial distribution of soil physicochemical characteristics and heavy metal toxicity potential in sediments of Nworie river micro-watershed Imo state, southeastern Nigeria. Environmental Chemistry and Ecotoxicology 3, 261–268.

Fan, J.Y., Fan, D.D., Wu, Y.J., 2023. Spatiotemporal variations of heavy metal historical accumulation records and their influencing mechanisms in the Yangtze River Estuary. Science of the Total Environment 854.

Gao, X., Chen, C.-T.A., 2012. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay. Water research 46, 1901–1911.

Ghosh, S.P., Maiti, S.K., 2018. Evaluation of heavy metal contamination in roadside deposited sediments and road surface runoff: a case study. Environ Earth Sci 77.

Gokkus, K., Berber, S., 2019. Heavy metal pollution in Inebolu and Bartin Ports, Black Sea, Turkey. Indian J Geo-Mar Sci 48, 1600–1608.

Hauke, J., Kossowski, T., 2011. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. Quaestiones geographicae 30, 87–93.

Hu, B., Guo, P., Wu, Y., Deng, J., Su, H., Li, Y., Nan, Y., 2021a. Study of soil physicochemical properties and heavy metals of a mangrove restoration wetland. Journal of Cleaner Production 291, 125965.

Hu, X.P., Shi, X.Y., Su, R.G., Jin, Y.M., Ren, S.J., Li, X.X., 2022. Spatiotemporal patterns and influencing factors of dissolved heavy metals off the Yangtze River Estuary, East China Sea. Marine Pollution Bulletin 182.

Hu, Y., He, N., Wu, M.X., Wu, P.L., He, P.M., Yang, Y., Wang, Q.Y., Wang, M.Q., Fang, S.B., 2021b. Sources and ecological risk assessment of the seawater potentially toxic elements in Yangtze River Estuary during 2009-2018. Environ Monit Assess 193.

Janaki-Raman, D., Jonathan, M.P., Srinivasalu, S., Armstrong-Altrin, J.S., Mohan, S.P., Ram-Mohan, V., 2007. Trace metal enrichments in core sediments in Muthupet mangroves, SE coast of India: Application of acid leachable technique. Environ Pollut 145, 245–257.

Jia, H., Huo, J., Fu, Q., Duan, Y., Lin, Y., He, Y., Cheng, J., 2022. Insights into characteristics, source variation, and health risks mitigation of airborne heavy metal (loid) s in Shanghai during China International Import Expo. Urban Climate 44, 101193.

Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A., Cao, H., 2017. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. Chemosphere 168, 1658–1668.

Kang, M., Tian, Y., Peng, S., Wang, M., 2019. Effect of dissolved oxygen and nutrient levels on heavy metal contents and fractions in river surface sediments. Science of the total environment 648, 861–870.

Ke, X., Gui, S., Huang, H., Zhang, H., Wang, C., Guo, W., 2017. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China. Chemosphere 175, 473–481.

Li, X., Yang, J., Fan, Y., Xie, M., Qian, X., Li, H., 2021. Rapid monitoring of heavy metal pollution in lake water using nitrogen and phosphorus nutrients and physicochemical indicators by support vector machine. Chemosphere 280, 130599.

Li, Y.Z., Ma, L., Ge, Y.X., Abuduwaili, J., 2022. Health risk of heavy metal exposure from dustfall and source apportionment with the PCA-MLR model: A case study in the Ebinur Lake Basin, China. Atmos Environ 272.

Li, Z., Li, X.Z., Wang, S.H., Che, F.F., Zhang, Y.,

Yang, P.J., Zhang, J.B., Liu, Y.X., Guo, H.C., Fu, Z.H., 2023. Adsorption and desorption of heavy metals at water sediment interface based on bayesian model. J Environ Manage 329.

Liang, J., Liu, Z., Tian, Y., Shi, H., Fei, Y., Qi, J., Mo, L., 2023. Research on health risk assessment of heavy metals in soil based on multi-factor source apportionment: A case study in Guangdong Province, China. Science of The Total Environment 858, 159991.

Liu, X., Jiang, J., Yan, Y., Dai, Y., Deng, B., Ding, S., Su, S., Sun, W., Li, Z., Gan, Z., 2018. Distribution and risk assessment of metals in water, sediments, and wild fish from Jinjiang River in Chengdu, China. Chemosphere 196, 45–52.

Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Olias, M., Canovas, C.R., Riba, I., Kalman, J., Delvalls, T.A., 2007. Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary. Environ Int 33, 445–455.

Ravisankar, R., Tholkappian, M., Chandrasekaran, A., Eswaran, P., El-Taher, A., 2019. Effects of physicochemical properties on heavy metal, magnetic susceptibility and natural radionuclides with statistical approach in the Chennai coastal sediment of east coast of Tamilnadu, India. Applied Water Science 9, 1–12.

Soon, Z.Y., Jung, J.H., Yoon, C., Kang, J.H., Kim, M., 2021. Characterization of hazards and environmental risks of wastewater effluents from ship hull cleaning by hydroblasting. J Hazard Mater 403.

Soroldoni, S., Castro, Í.B., Abreu, F., Duarte, F.A., Choueri, R.B., Möller Jr, O.O., Fillmann, G., Pinho, G.L.L., 2018. Antifouling paint particles: sources, occurrence, composition and dynamics. Water research 137, 47–56.

Su, C., Wang, J., Chen, Z., Meng, J., Yin, G., Zhou, Y., Wang, T., 2023. Sources and health risks of heavy metals in soils and vegetables from intensive human intervention areas in South China. Science of The Total Environment 857, 159389.

Sun, X.S., Fan, D.J., Liu, M., Tian, Y., Pang, Y., Liao, H.J., 2018. Source identification, geochemical normalization and influence factors of heavy metals in Yangtze River Estuary sediment. Environ Pollut 241, 938–949.

Wang, G., Liu, Y., Chen, J., Ren, F.F., Chen, Y.Y., Ye, F.Z., Zhang, W.G., 2018a. Magnetic evidence for heavy metal pollution of topsoil in Shanghai, China. Front Earth Sci-Prc 12, 125–133.

Wang, J., Su, J.W., Li, Z.G., Liu, B.X., Cheng, G.H., Jiang, Y.H., Li, Y.C., Zhou, S.Q., Yuan, W.Y., 2019. Source apportionment of heavy metal and their health risks in soil-dustfall-plant system nearby a typical non-ferrous metal mining area of Tongling, Eastern China. Environ Pollut 254.

Wang, X., Zhang, L., Zhao, Z., Cai, Y., 2018b. Heavy metal pollution in reservoirs in the hilly area of southern China: Distribution, source apportionment and health risk assessment. Science of the Total Environment 634, 158–169.

Wold, S., Esbensen, K., Geladi, P., 1987. Principal component analysis. Chemometrics and intelligent laboratory systems 2, 37–52.

Xie, T., Shi, Z., Gao, Y., Tan, L., Meng, L., 2021. Modeling analysis of the characteristics of selenium-rich soil in heavy metal high background area and its impact on main crops. Ecological Informatics 66, 101420.

Yang, X., Zhou, X., Kan, T., Strezov, V., Nelson, P., Evans, T., Jiang, Y., 2019. Characterization of size resolved atmospheric particles in the vicinity of iron and steelmaking industries in China. Science of the Total Environment 694, 133534.

Yin, S., Wu, Y.H., Xu, W., Li, Y.Y., Shen, Z.Y., Feng, C.H., 2016. Contribution of the upper river, the estuarine region, and the adjacent sea to the heavy metal pollution in the Yangtze Estuary. Chemosphere 155, 564–572.

Zahra, A., Hashmi, M.Z., Malik, R.N., Ahmed, Z., 2014. Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah-Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. Science of the Total Environment 470, 925–933.

Zhang, C., 2006. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. Environ Pollut 142, 501–511.

ABOUT THE AUTHORS

Sha Lou, College of Civil Engineering, Tongji University; Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University. Associate professor. lousha@tongji.edu.cn

Yuwen Zou, College of Civil Engineering, Tongji University. Doctoral student. zouyuwen@tongji.edu.cn

Shuguang Liu, College of Civil Engineering, Tongji University; Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University. Professor. liusgliu@tongji.edu.cn

Guihui Zhong, College of Civil Engineering, Tongji University. Professor. guihui_zhong@tongji.edu.cn

Zhirui Zhang, College of Civil Engineering, Tongji University. Doctoral student. 2111014@tongji.edu.cn

УДК 627.4, 656.65

РАЗРАБОТКА РУСЛОВЫХ И ПОЙМЕННЫХ КАРЬЕРОВ НА Р. ВЕРХНЕЙ БЕЛОЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА И УСЛОВИЯ СУДОХОДСТВА

Ю.Е. Воронина

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия
yulez@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.01.2025
После доработки 20.02.2025
Принята к публикации 25.02.2025

Аннотация. Аннотация. Ухудшение гидрологических и судоходных условий, снижение обеспеченности гарантированных глубин на р. Верхняя Белая является следствием активной работы по добыче нерудных строительных материалов на существующих карьерах. Карьерные разработки, проводимые в пойме реки, через некоторое время из-за ненадлежащего укрепления береговой полосы переходят в разряд русловых, тем самым начиная активно влиять на гидравлику потока. Из-за большого количества карьеров произошли значительные деформации русла реки. Система плес-перекат нарушена, и русло неспособно держать уровни воды на естественных отметках, что приводит к посадке уровня на участке. Для восстановления нормального хода русловых процессов и естественного уровня воды в реке необходимо длительное время и практически полный отказ от карьерных выработок в русле

Ключевые слова: русловой карьер, вертикальная деформация, уровень воды, судоходство

DOI: 10.71367/3034-4638-2025-2-2-58-67

Русло и пойма р. Верхняя Белая подвержены значительному антропогенному воздействию. К нему относится интенсивная добыча песчано-гравийной смеси (ПГС) из русла и на пойме, а также строительство мостовых переходов.

Добыча ПГС из русла проводится в течение многих десятилетий. Однако достоверной документации об объемах добычи и местоположении до 1983 г. не имеется. В настоящее время разработка карьеров ведется постоянно и с каждым годом интенсифицируется. На планах русловых съемок часть карьеров обозначены соответствующими подписями, некоторые карьеры не имеют ни названия, ни пояснения в виде надписи «карьер» (рис. 1). Однако характер изменения очертания русла ярко демонстрирует наличие грунта, извлекаемого из русла реки. Причем если в начальный период извлечение велось в пределах поймы, то в последующем разработка производилась уже в самом русле.

Для установления наличия в русле и на пойме Верхней Белой реальных карьерных разработок детально проанализированы планы русловых съемок за 2011, 2017 и 2023 гг. Анализ планов путем их сопоставления по годам позволил оценить реальные масштабы карьерных разработок в русле, как учтенных, так и «завуалированных», появившихся в русле реки по неизвестным причинам. Оценка проводилась при сравнении местоположения карьеров в плане и их приближенных параметров (длины, ширины и возможной глубины) за 2011–2023 гг. Кроме того, дана характеристика состояния карьерных участков за рассматриваемые годы с динамикой изменения параметров и возможными причинами этих изменений. Выборочные и наиболее значимые результаты анализа приведены в табл. 1 и на рис. 1–4.

Как выявлено по русловым съемкам до 2017 г., на участке р. Верхней Белой от устья р. Сим до устья р. Уфы карьерные разработки не ведутся на верхнем участке 46–76 км судового хода. Все выемки грунта производятся на нижнем участке, ближе к г. Уфе и основным потребителям. Однако в 2023 г. выявлен факт подготовки выпуклого берега русла к карьерной разработке на 68 км судового хода путем возведения заградительных сооружений и подготовки береговой полосы к последующим работам.

Таблица 1. Характеристика наиболее активных карьеров (Р – русловых, П – пойменных) на р. Верхней Белой от устья р. Сим до устья р. Уфы за 2011, 2017 и 2023 гг.

Table 1. Characteristics of the most active quarries (Р – channel, П – floodplain) on the Belaya River from the mouth of the Sim River to the mouth of the Ufa River for 2011, 2017 and 2023

№ п/п	Название карьера	Км судового хода	Положение относительно судового хода	Тип	Максимальная глубина по русловым съемкам, м			Приблизительные параметры в плане (длина, ширина), м			Состояние карьера, его изменения			Рис. №
					2011	2017	2023	2011	2017	2023	2011	2017	2023	–
1	–	76.5–46.5	Карьеры отсутствуют*											–
2	Без названия	46.0	слева	П/Р	1.7	11.0	9.21	300 × 200	600 × 200	600 × 200	След от пойменного карьера	Возможная повторная разработка. Переход из разряда П в Р	Повторная разработка верхней части на 4.5 м, в нижней части на 2.5 м. Средняя часть с потерей глубны на 1.8 м	1
3	ООО «Башстройресурс»	42.0 (41–43 км в 2023 г.)	слева/посередине русла	П/Р	6.9	4.7	9.47–10.17	850 × 230	900 × 230	1800 × 230	П, врезанный в выпуклый берег	Полная срезка выпуклого берега, переход из разряда П в Р	Дополнительно две новые карьерные разработки по всей ширине русла на 41 и на 43 км с глубиной до 8 м	2
4	Без названия	31	посередине русла	Р	–	–	7.46	–	–	100 × 180	–	–	Новая карьерная разработка глубиной 5.5 м по всей ширине русла	3
5	МУП «Дирекция по строительству п. Нагаево»	29	справа	Р/П	2.5	2.5	–	660 × 100	700 × 210	–	След от пойменной части карьера. Значительная разработка русловой части со срезкой выпуклого берега	Занесенность русловой части карьера, значительная разработка пойменной, из-за чего размылся выпуклый бе-рег ниже по течению	Устройство системы полузапруд для возможного укрепления выпуклого берега, либо последующая разработка пойменного карьера	4

* В 2023 г. на 68 км судового хода выявлена подготовка к разработке руслового карьера у выпуклого берега.

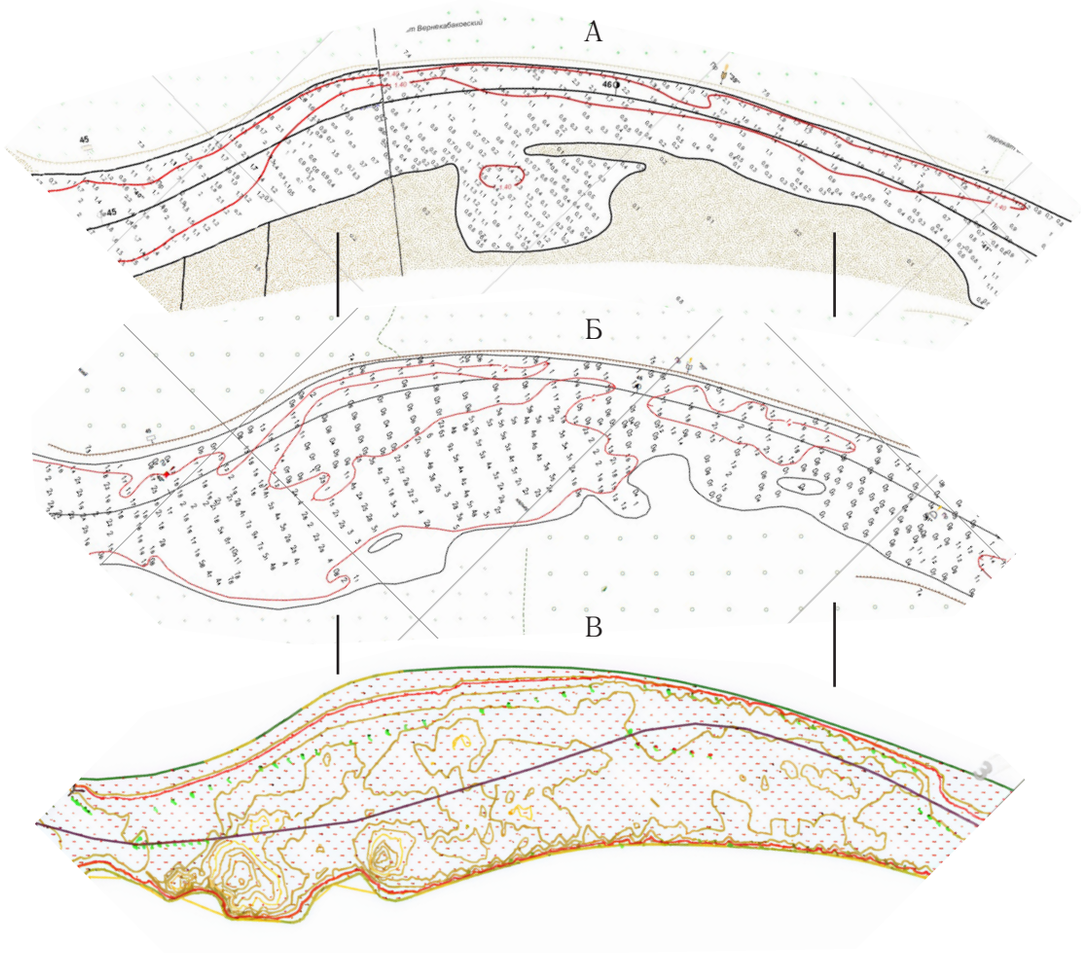


Рис. 1. Сопоставленные планы карьеров на 45–46 км судового хода: А – 2011 г.; Б – 2017 г.; В – 2023 г.

Fig. 1. Comparative plans of quarries at 45–46 km of the shipping lane: A – 2011; Б – 2017; B – 2023

В 2017 г. на участке в 46 км расположено 20 карьеров. К 2023 г. численность карьеров увеличена до 25, а на существующих карьерах ведется активное извлечение грунта с параметрами, значительно большими как в плане, так и по глубине.

По результатам анализа выявлено, что карьеры, изначально разрабатываемые в пойме реки без должного укрепления целика, а также пойменные карьеры, расположенные на крутых поворотах русла и имеющие значительные размеры, переходят в русловые естественным путем вследствие деформаций русла или повторных разработок в течение длительного срока (Оценка возможности разработки..., 2023).

К основным значимым результатам анализа можно отнести:

1. Плотность расположения карьеров на рассматриваемом участке Верхней Белой неравномерна. Все карьеры располагаются на 0–46 км судового хода. Таким образом, расстояние по длине реки между карьерами составляет от 0.5 до 9 км при средней величине 2.5 км.

2. Выявлено 40% (10 из 25) от общего числа карьеров, каким-либо образом не зафиксированных документально в привязке к картам реки, что скорее всего говорит о неправомерности извлечения грунта на участке. Кроме того, выявлено «злоупотребление» параметрами карьеров у организаций путем дополнительных разработок в середине русла реки (см. рис. 2, 3).

3. Все пойменные карьеры, располагаемые на выпуклых берегах излучин русла без должного укрепления целиков, изменили вид, перейдя в форму русловых карьеров (см. рис. 1), что оказывает значительное влияние на гидравлику потока, деформации русла и уровни воды.

4. Системы полузапруд до 2011 г. работали для поддержания глубин в русле р. В. Белая. В более поздний период новое устройство систем выправительных сооружений направлено лишь на рост

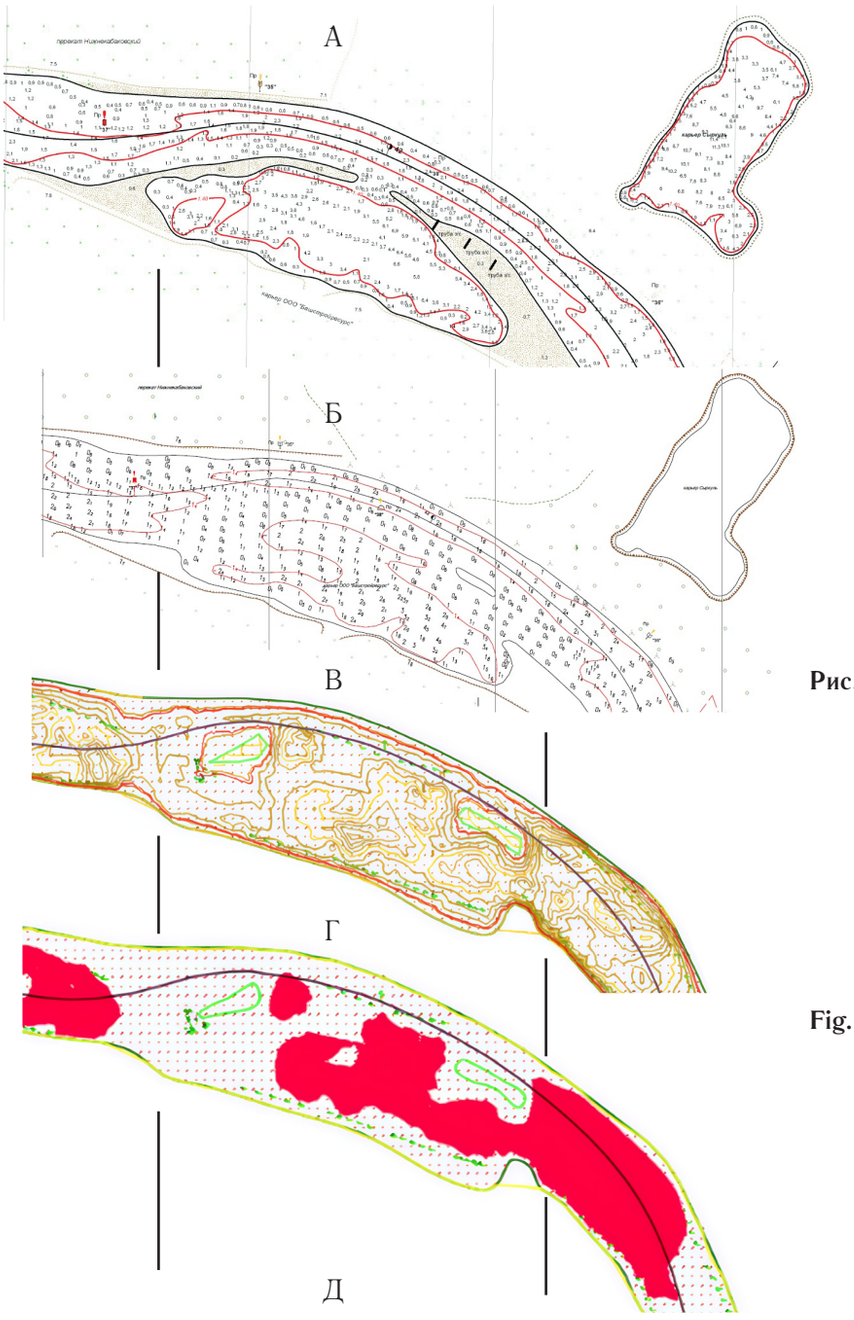


Рис. 2. Сопоставленные планы руслового карьера ООО «Башстройресурс» и пойменного карьера Сыркуль на 42 км судового хода: А – 2011 г.; Б – 2017 г.; В – 2023 г.; Г – предполагаемые границы карьера ООО «Башстройресурс» глубиной более 4 м (красные зоны); Д – космоснимок Google карьера Сыркуль, 2023 г.

Fig. 2. Comparative plans of the channel quarry of Bashstroyresurs LLC and the floodplain quarry Syrkul at 42 km of the shipping canal: А – 2011; Б – 2017; В – 2023; Г – the expected boundaries of the quarry of Bashstroyresurs LLC with a depth of more than 4 m (red zones); Д – Google satellite image of the Syrkul quarry, 2023

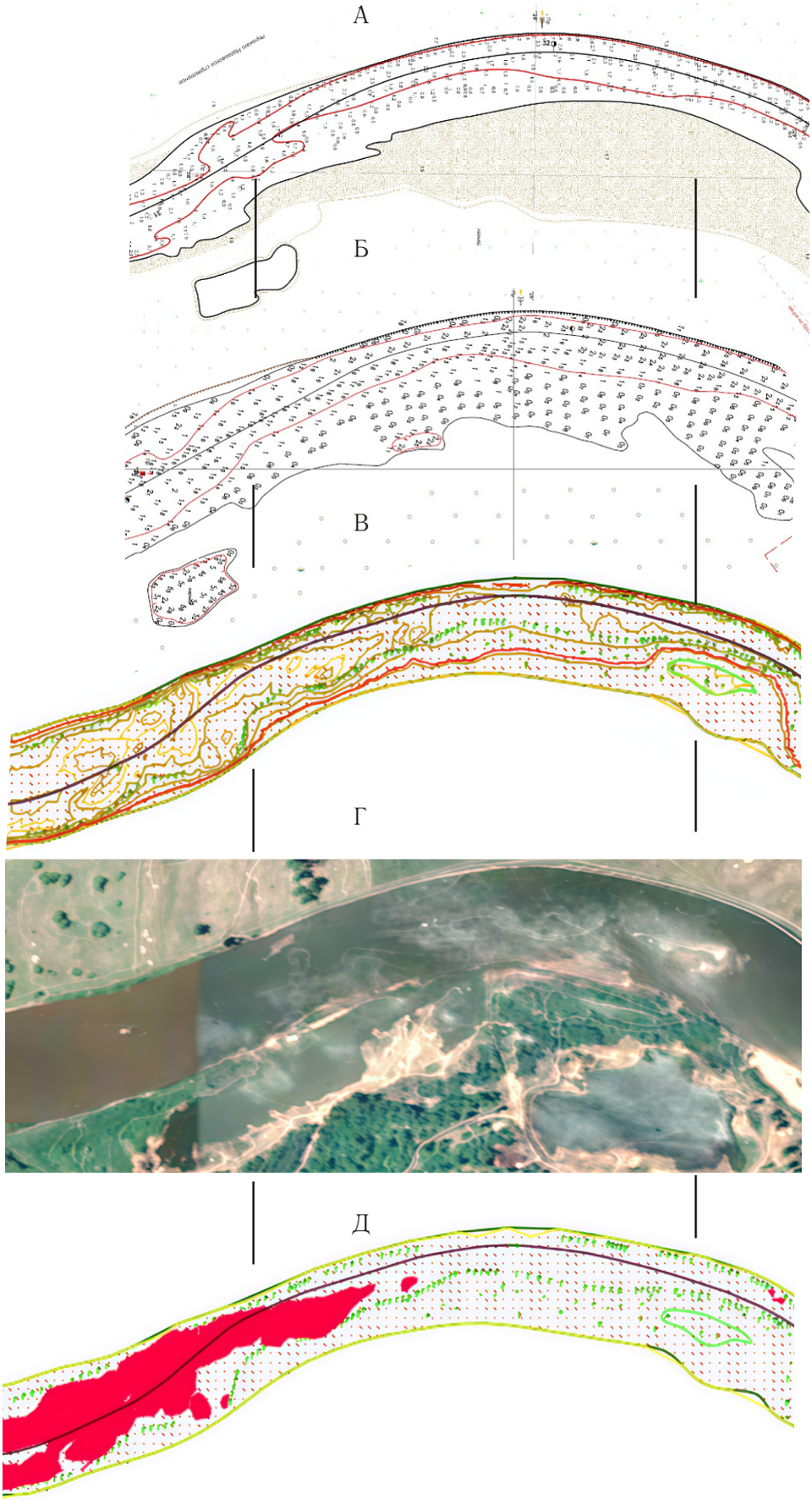


Рис. 3. Сопоставленные планы возможного руслового карьера у левого берега, пойменного карьера на 31–32 км судового хода и карьерной разработки в середине русла: А – 2011 г.; Б – 2017 г.; В – 2023 г.; Г – космоснимок Google пойменного карьера на 31–32 км за 2023 г.; Д – выявленные границы карьера по увеличенной глубине более 4 м (красные зоны)

Fig. 3. Comparative plans of a possible channel quarry near the left bank, a floodplain quarry at 31–32 km of the shipping channel and quarry development in the middle of the channel: А – 2011; Б – 2017; В – 2023; Г – Google satellite image of the floodplain quarry at 31–32 km in 2023; Д – identified quarry boundaries at increased depths of more than 4 m (red zones)

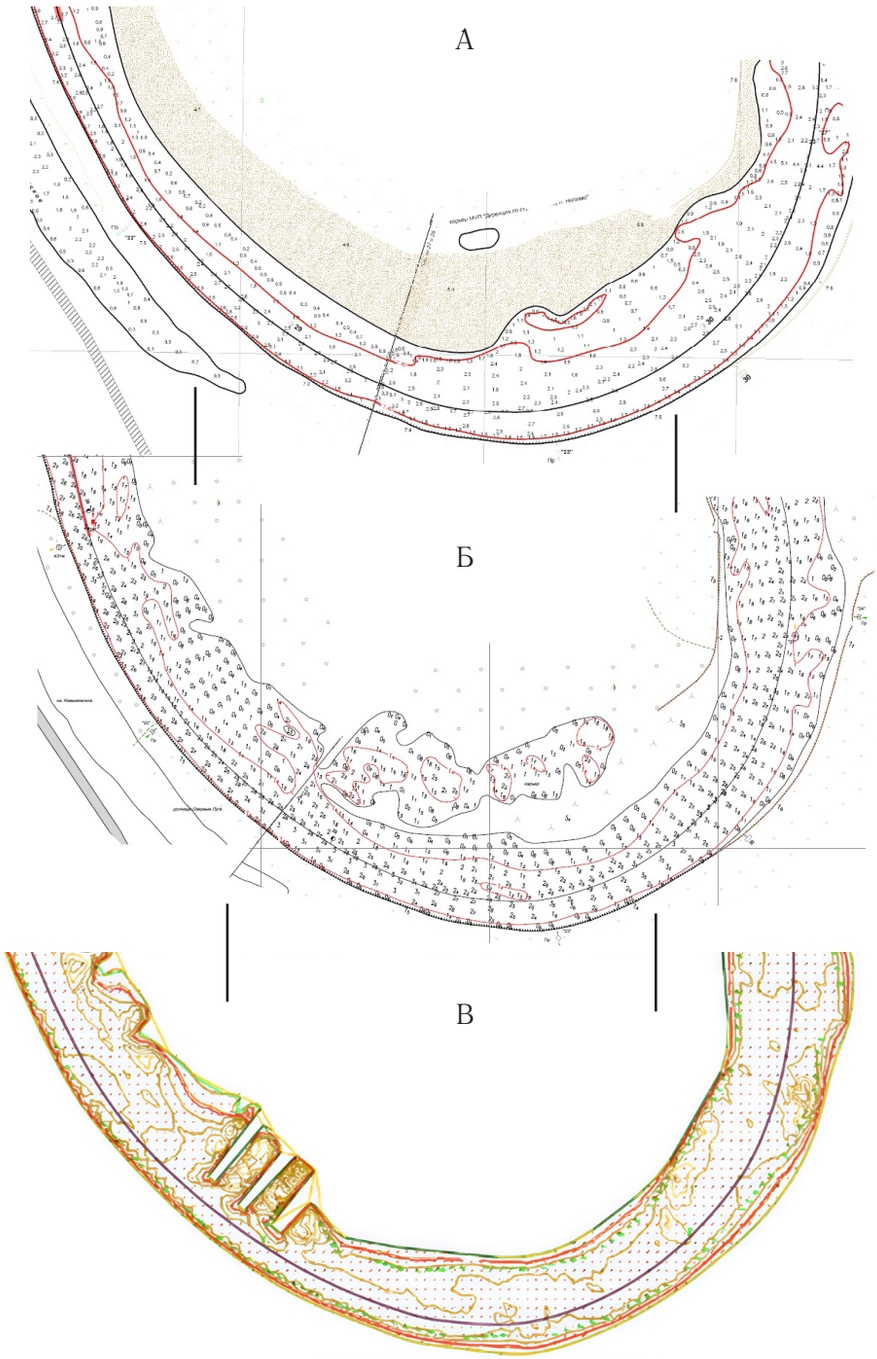


Рис. 4. Сопоставленный план карьера МУП «Дирекция по строительству п. Нагаево» на 30 км судового хода: А – 2011 г.; Б – 2017 г.; В – 2023 г.

Fig. 4. Comparative plan of the quarry of the Municipal Unitary Enterprise "Directorate for Construction of the Settlement of Nagaevo" at 30 km of the shipping canal: А – 2011; Б – 2017; В – 2023

выпуклых берегов излучин для их последующих разработок (см. рис. 4).

Построение совмещенных продольных профилей позволяет выявить вертикальные деформации русла, которые заключаются в намыве и размыве перекатов и изменении их отметок. Кроме того, по совмещенным продольным профилям можно оценить общее изменение в параметрах русла, связанное с его трансформацией (в системе «плёс–перекат»).

Для анализа вертикальных деформаций использовались планы русловых съемок р. Верхней Белой за характерные годы. Совмещенные продольные профили за 2011 и 2017 гг. показаны на рис. 5.

Анализ продольных профилей выявил преобладание зон размыва русла по отношению к зонам аккумуляции наносов. При этом аккумуляции наблюдаются на перекатных участках, а размыв дна – в глубоких плёсовых лощинах. Такие деформации, по-видимому, объясняются как оползанием откосов в карьерные ямы, расположенные близко к судовому ходу в районе плёсовых лощин, так и формированием нового трансформированного русла. При такой динамике изменений в продольных

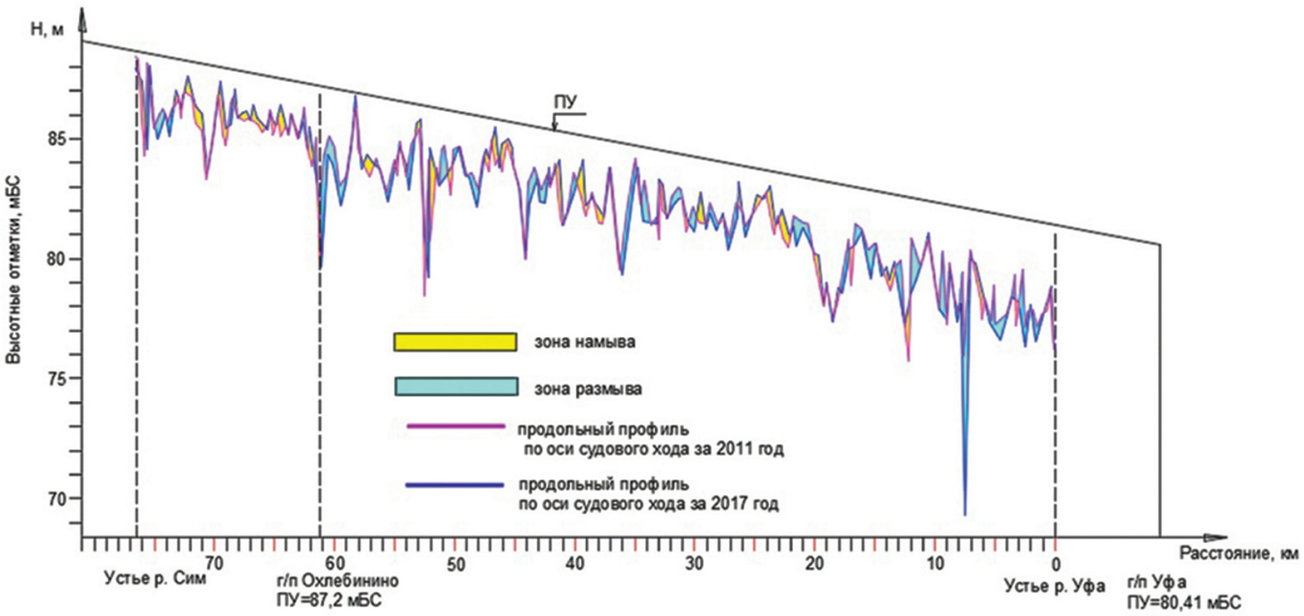


Рис. 5. Совмещенный продольный профиль русла р. Верхней Белой по оси судового хода от устья р. Уфы до устья р. Сим за 2011 и 2017 гг.

Fig. 5. Combined longitudinal profile of the Verkhnyaya Belaya River channel along the axis of the shipping channel from the mouth of the Ufa River to the mouth of the Sim River for 2011 and 2017

профилях создается ярко выраженное разделение русла по длине на отдельные участки, границами которых служат мелководные перекаты. Таким образом, русло трансформируется на так называемое каскадное разделение, где глубоководные участки с относительно малыми скоростями и соответственно небольшими уклонами свободной поверхности чередуются со сравнительно короткими участками переливов воды из одного искусственно созданного «бассейна» в другой, расположенный ниже по участку реки. Местами переливов служат мелководные перекаты, где вследствие значительного уменьшения площадей поперечного сечения в русле при прохождении одного и того же расхода, что и выше по течению, создаются большие скорости потока. Перекаты начинают работать как естественные подводные водосливы в стадии коротких лотков. Энергия потока в сжатом сечении переката недостаточна для плавного преодоления сопротивления на нем. Поток непосредственно за гребнем переката переходит из «бурного» состояния через прыжок-волну в спокойное состояние на участок ниже по течению. Описанная картина схожа по принципу движения потока через донный водослив, работающий в стадии отогнанного прыжка. Причем поток успокаивается, достигая максимальных глубоких мест за перекатами. Так, например, проходя перекат Нижнекиешкинский, расположенный на 24 км судового хода, поток, переливаясь через гребень, по инерции «добегает» до 18 км, после чего скорости замедляются и уклоны уменьшаются. Похожая картина наблюдается и на других мелководных перекатах.

В целом наибольшие деформации дна, связанные как с карьерными разработками, так и с естественными эрозионными процессами, наблюдаются на нижнем участке 0–18 км судового хода, где образуется нижний из каскадов «бассейна».

Сопоставление площадей зон размыва и намыва по совмещенному профилю (рис. 5) показало общее увеличение емкости русла по отметкам дна на 28% за шесть лет (2011–2017 гг.). Ввиду того, что дноуглубительные работы на транзите р. Верхней Белой ведутся эпизодически, не ежегодно, увеличение объема русла происходит в основном за счет карьерных разработок, интенсивно проводимых в реке.

Анализ совмещенного продольного профиля по оси судового хода за период 2017–2023 гг. (рис. 6) показал значительную разработку русла в глубину уже и в районе основного стрежня потока. Причем наиболее сильные деформации размыва наблюдаются на участке 9–46 км судового хода, где сосредоточены все русловые карьеры. Если за предыдущий период увеличение емкости русла по всей ширине реки составило 28%, то за второй период (с 2017 по 2023 г.) только по оси судового

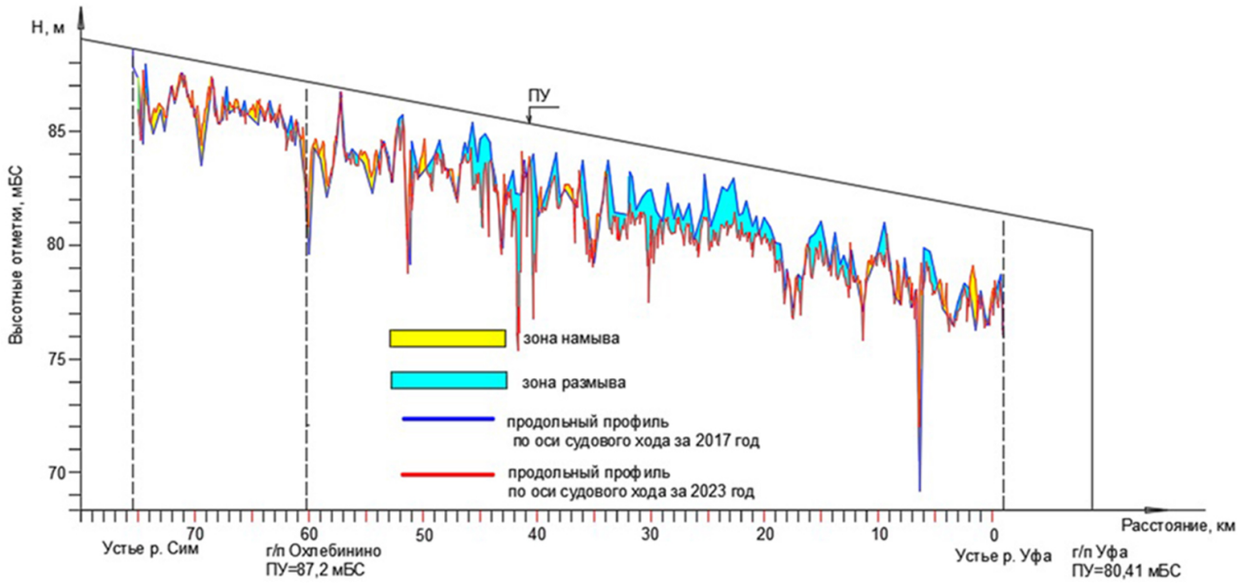


Рис. 6. Совмещенный продольный профиль русла р. Верхней Белой по оси судового хода от устья р. Уфы до устья р. Сим за 2017 и 2023 гг.

Fig. 6. Combined longitudinal profile of the Verkhnyaya Belaya River channel along the axis of the shipping channel from the mouth of the Ufa River to the mouth of the Sim River for 2017 and 2023

хода общее увеличение глубин было 33%, а при анализе изменения емкости всего русла на рассматриваемом участке 0–76 км судового хода выявлено, что оно увеличилось на 13%. Такое существенное увеличение параметров ложа реки является результатом чрезмерного неконтролируемого извлечения грунта при выполнении карьерных работ. Если раньше (до 2017 г.) карьеры увеличивали русло только за счет разработки береговой полосы, то в последнее время карьеры стали углублять и судовой ход, и русло в целом. Система «плёс–перекат» полностью нарушена, что неизбежно приводит к «неспособности» реки держать уровень воды на естественных отметках и к значительным его посадкам.

Пропускная способность водного пути определяет величину грузо- и судопропускной способности флота. По габаритам судового хода участок р. Верхней Белой от устья р. Уфы до устья р. Сим разделен на две части. Нижняя по течению часть 0–32 км относится к 3 классу рек с гарантированными габаритами по глубине 1.2 м, однако проектный уровень воды здесь не выдерживается и фактически глубины, назначаемые от указанного уровня, в период навигации не выдерживаются. В вышерасположенной части 32–76.5 км гарантированные габариты судового хода не установлены.

Полученное расчетным путем (Руководство..., 1978) значение возможной достигаемой судоходной глубины с учетом гидравлических особенностей русла в реальных условиях с учетом наличия всех русловых карьеров на участке составляет

$$T_{\text{сх}}^{\max} = 1.215 \text{ м}.$$

Оно меньше, чем необходимая глубина 1.4 м (с учетом технологии дноуглубительных работ, связанных с переуглублением русла в виде запаса на неровность выработки – 0.15–0.2 м) (Инструкция..., 1989).

С учетом того, что длительное время на участке ведутся карьерные разработки, повлекшие за собой посадку уровня воды более чем на 1 м относительно проектного уровня, достижение и, самое главное, удержание гарантированных глубин судового хода 1.2 м на участке не представляется возможным. Достижение расчетного параметра глубины 1.4 м (с учетом запаса на неровность выработки) возможно лишь после длительного периода восстановления русла в его естественных параметрах. Появившаяся в результате интенсивных карьерных работ посадка привела к исчерпанию возможностей реки устойчиво выдерживать гарантированные для судоходства глубины на протяжении всего участка.

Соблюдение гидравлически допустимой глубины является сложной задачей восстановления естественного уровня воды на участке. Этого можно достичь лишь полным отказом от разработки русловых карьеров либо их сильным сокращением. В противном случае достичь и удержать судоходную глубину 1.2 м на всем участке от устья р. Уфы до устья р. Сим не получится.

При одномоментном значительном увеличении гарантированной глубины проявится локальное понижение уровня воды на отдельных перекатах участка с распространением вверх по течению практически на пять длин судоходных прорезей (Воронина, 2004). Тогда для нормализации соотношения «глубина – проектный уровень с нормируемой обеспеченностью» появится необходимость понижения проектного уровня. В итоге понижение отметки дна позволит увеличить транзитную глубину лишь в части от заявленной.

Задача определения целесообразности достижения максимально возможной глубины решается путем экономической оценки мероприятий по производству путевых работ на участке и технических возможностей хозяйствующих подразделений Администрации бассейна, а также полным контролем проводимых в русле карьерных работ как по местоположению, глубине разработки, так и по плановым параметрам.

Кроме того, влияние дноуглубительных работ может существенно возрасти при реализации программы по установлению гарантированной глубины на всем исследуемом участке р. В. Белая, поскольку они могут спровоцировать увеличение доли посадки уровня воды. С учетом этого одновременная интенсивная добыча НСМ из русла реки и проведение дноуглубительных работ невозможны из-за их совместного значительного влияния на уровенный режим.

Таким образом, на р. В. Белая для восстановления судоходства необходимо обеспечить минимизацию неблагоприятного воздействия добычных работ на состояние пойменно-руслового комплекса путем полного отказа от карьерных работ либо существенного их сокращения. Это должно способствовать восстановлению русла реки и повышению устойчивости судового хода в части обеспечения гарантированной глубины на нем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Оценка возможности разработки действующих карьеров и выделения участков для разведки и последующей разработки карьеров по добыче нерудных строительных материалов с учетом обеспечения устойчивости судового хода и недопустимости посадки уровня воды в существующих условиях на реке Верхняя Белая. Том 1. Отчет по НИР. Н. Новгород: ВГУВТ, 2023. 276 с.

Руководство по методам расчета планирования и оценке эффективности путевых работ на свободных реках. М.: Транспорт, 1978. 104 с.

Отчет о научно-исследовательской работе «Переработать руководство по проектированию коренного улучшения судоходных условий на затруднительных участках свободных рек (заключительный)». Л.: ЛИВТ. 1990. 418 с.

Инструкция по землечерпательным работам / Минречфлот РСФСР. М.: Транспорт, 1989. 64 с.

Воронина Ю.Е. Канализирование русел судоходных рек с целью повышения безопасности судоходства. Дисс. ... канд. техн. наук. Н. Новгород: ВГАВТ. 2004. 181 с.

ОБ АВТОРЕ

Воронина Юлия Евгеньевна, доцент, к.т.н., доцент кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: yulez@yandex.ru

DEVELOPMENT OF CHANNEL AND FLOODPLAIN QUARRY ON THE VERKHNYAYA BELAYA RIVER AND THEIR INFLUENCE ON CHANNEL DEFORMATIONS AND NAVIGATION CONDITIONS

Yu.E. Voronina

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Active work on the extraction of non-metallic building materials in existing quarries leads to deterioration of hydrological and navigation conditions. On the upper part of the Belaya River, the provision of guaranteed depths is reduced. Significant deformations of the river bed occurred due to the large number of quarries. A long period of time and almost complete abandonment of quarry workings in the riverbed is needed to restoring the natural course of riverbed processes and the water level in the river.

Keywords: riverbed quarry, vertical deformation, water level, navigation

REFERENCES

Ocenka vozmozhnosti razrabotki dejstvuyushhix karʹerov i vyʺdeleniya uchastkov dlya razvedki i posleduyushhej razrabotki karʹerov po dobyʺche nerudnyʺx stroiteľnyʺx materialov s uchetom obespecheniya ustojchivosti sudovogo xoda i nedopustimosti posadki urovnya vodyʺ v sushhestvuyushhix usloviyax na reke Verhnyaya Belaya. Tom 1. Otchet po NIR. N. Novgorod: VGUVT, 2023. 276 s.

Rukovodstvo po metodam rascheta planirovaniya i ocenke eʺffektivnosti putevyʺx rabot na svobodnyʺx rekax. M.: Transport, 1978. 104 s.

Otchet o nauchno-issledovateľskoj rabote «Pererabotatʹ rukovodstvo po proektirovaniyu korennogo uluchsheniya sudoxodnyʺx uslovij na zatrudniteľnyʺx uchastkax svobodnyʺx rek (zaklyuchiteľnyj)». L.: LIVT. 1990. 418 s.

Instrukciya po zemlecherpateľnyʺm rabotam / Minrechflot RSFSR. M.: Transport, 1989. 64 s.

Voronina Yu.E. Kanalizirovanie rusel sudoxodnyʺx rek s ceľyu povyʺshenie bezopasnosti sudoxodstva. Diss. ... kand. tex. nauk. N. Novgorod: VGAVT. 2004. 181 s.

ABOUT THE AUTHOR

Yulia E. Voronina, PhD in Associate Professor of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

УДК 556.536

ВНУТРЕННИЕ ВОДНЫЕ ПУТИ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА СВОБОДНЫХ И ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ РЕКАХ

Г.Л. Гладков

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия

gladkovgl@gumrf.ru

Поступила в редакцию: 10.02.2025
После доработки: 12.02.2025
Принята к публикации: 16.02.2025

Аннотация. В современных условиях при содержании судовых ходов на внутренних водных путях необходимо учитывать естественный ход развития руслового процесса, сезонные и многолетние деформации русел, климатообусловленные изменения характеристик речного стока, а также антропогенные изменения водного и руслового режимов судоходных рек. Последний фактор проявляется вследствие инженерного (техногенного) воздействия, а также в результате регулирования речного стока гидроузлами. Проведенные исследования показали, что к настоящему времени на целом ряде участков крупных судоходных рек России в силу этих причин произошли эрозионное врезание русел и необратимое понижение меженных уровней воды. На отдельных участках водных путей эти изменения стали критическими для обеспечения безопасного судоходства, что потребовало проведения реконструкции существующих судопропускных гидротехнических сооружений и строительства новых низконапорных гидроузлов. В настоящее время на р. Волге проводится реконструкция Городецких шлюзов для обеспечения судоходства на лимитирующем участке от створа Нижегородской ГЭС до г. Нижнего Новгорода; на р. Дон строится Багаевский низконапорный гидроузел. Возобновилось строительство Красногорского водоподъемного гидроузла на р. Иртыш в районе г. Омска. Рассматриваются возможные варианты для решения проблемы обеспечения судоходства на участке р. Камы от створа Воткинской ГЭС до п. Камбарки. Исследования скоростного режима речного потока, выполненные в нижних бьефах гидроузлов, показали, что при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе отмечается активизация транспорта наносов, как в летний период наблюдений — в условиях открытого русла, так и зимой, при движении воды подо льдом.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, параметры донных гряд, русловые переформирования

DOI: 10.71367/3034-4638-2025-2-2-68-79

ВВЕДЕНИЕ

Протяженность внутренних водных путей России составляет 101.7 тыс. км, из которых 50.2 тыс. км – пути с гарантированными габаритами. На протяжении 38.8 тыс. км путей обеспечивается возможность круглосуточного движения судов в течение навигации. Потребности внутреннего водного транспорта обслуживает 741 гидротехническое сооружение (Транспортная стратегия..., 2021). Количество грузовых судов внутреннего водного транспорта в настоящее время составляет 21.2 тыс. единиц, в т.ч. пассажирских и грузопассажирских транспортных судов внутреннего водного транспорта – 2.2 тыс. единиц. Средний возраст судов внутреннего водного транспорта превысил 40 лет. Объем грузовых перевозок внутренним водным транспортом в 2023 г. составил 109.3 млн тонн при средней дальности перевозки около 600 км.

Объем пассажирских перевозок внутренним водным транспортом составил 10.6 млн пассажиров, в том числе объем перевозок в международном сообщении составил более 100 тыс. пассажиров. Объем перевозок на переправах – 4.8 млн пассажиров, объем внутригородских перевозок – 1.5 млн пассажиров, объем пригородных перевозок –

2.17 млн пассажиров, объем туристических круизов – 369.7 тыс. пассажиров.

При проектировании и содержании судовых ходов на внутренних водных путях в современных условиях необходимо учитывать естественный русловой режим и деформации русел, климатообусловленные изменения характеристик речного стока, а также антропогенные изменения водного и руслового режимов судоходных рек.

КЛИМАТООБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА

К настоящему времени практически на всех судоходных реках России произошли значимые изменения характеристик внутригодового распределения речного стока вследствие развития глобальных климатообусловленных процессов. В разных речных бассейнах эти изменения проявились различным образом.

Исследования динамики изменения характеристик водных ресурсов страны, выполненные Государственным гидрологическим институтом за 1936–2012 гг. (Георгиевский, Шалыгин, 2012; Георгиевский и др., 2013), Институтом водных проблем РАН и Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова (Гельфан и др., 2021), а также материалы Третьего оценочного доклада Росгидромета (Третий оценочный доклад..., 2022) показали, что за последние три десятилетия в этом ряду наблюдений водные ресурсы испытывают значительные изменения во времени.

На европейской территории России произошла интенсификация гидрологического цикла, проявившаяся в росте величин осадков, речного стока, испарения и потенциального испарения. При этом для крупнейших рек бассейна Северного Ледовитого океана (Печора, Енисей, Лена) характерно повышение их водности. В изменение величины годового стока основной вклад внесло изменение слоя годовых осадков. Годовой сток рек Сибири и Дальнего Востока в арктические моря России неуклонно растет с 1980-х гг. Наиболее заметен рост в нижней части бассейна Иртыша и на Обь-Иртышском междуречье, на восточном склоне Уральских гор, а также на территории от Хатанги до Колымы. В последние 30 лет в средней и южной части европейской территории России – в бассейнах Волги, Оки, Вятки, Дона – наблюдаются снижение объемов половодья, рост меженных расходов воды и увеличение доли паводочного стока.

Главной особенностью изменения внутригодового распределения стока воды в пределах значительной части ЕТР стало уменьшение роли половодья в формировании годового стока рек, уменьшение максимальных и значительное увеличение минимальных расходов воды. Типичный для рек региона восточно-европейский тип водного режима с одним годовым максимумом стока трансформируется в режим, для которого характерен гребенчатый тип гидрографа в период максимального стока. Ранее таких изменений водного режима не происходило вследствие доминирующей роли стока за период весеннего половодья. В этих районах в результате повышения зимних температур воздуха возросли число и продолжительность оттепелей, уменьшились предвесенние запасы воды.

Увеличение водности рек в зимний сезон года характерно практически для всей территории страны. Зимний сток в бассейнах Волги, Дона, рек запада ЕТР возрос на 50–120%. В колебаниях минимального стока холодного периода выявлены статистически значимые положительные тренды. Они обусловлены увеличением увлажненности, подземного питания рек и значительным возрастанием естественной зарегулированности стока.

Летне-осенний сток рек во многих регионах России также возрос. Наиболее существенное его увеличение (на 40–70%) характерно для рек южной части лесной, лесостепной и степной зон ЕТР. В верхней части бассейна Северной Двины это увеличение не превышало 25%. На реках юга Западной Сибири минимальные расходы воды в целом возрастали (на фоне увеличения коэффициента вариации стока), увеличение зимнего стока на 20–40% произошло на реках бассейна Лены, а также в бассейнах рек Оленёк, Яны, Индигирки.

В результате проявления на реках однонаправленных положительных линейных трендов стока в летне-осенний и зимний периоды произошли нарушения однородности (стационарности) многолетних рядов наблюдений. Эти изменения необходимо будет учитывать в дальнейшем в практической деятельности при гидрологическом обосновании путевых мероприятий на внутренних водных путях. Использование новых данных в области речной гидрологии позволит существенным образом улучшить качество гидрологического обеспечения условий судоходства на внутренних водных путях.

Можно предположить, что в отдельных бассейнах водных путей вследствие перераспределения внутригодового стока в пользу меженно-осеннего периода произойдет заметное повышение уровней воды в маловодные периоды навигации. В этих бассейнах возможно ослабление зависимости качества судоходных условий на плёсах от объемов эксплуатационного землечерпания. Вместе с изменением гидрологического режима на судоходных

реках будут происходить изменения характера и интенсивности сезонных деформаций перекатов, их морфологии, переформирований разветвлений речных русел в связи с новыми условиями рассредоточения стока по рукавам, изменения условий спрямления излучин и отторжения побочней и др.

В связи с этим придется вносить определенные корректировки в сложившиеся и апробированные за длительный период методы проектирования и выполнения дноуглубительных работ на судоходных плёсах, в практику трассирования эксплуатационных прорезей и капитальных выправительных работ.

АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛОВОГО РЕЖИМА

Другим аргументом, обусловливающим необходимость разработки гидрологического обеспечения условий судоходства на внутренних водных путях, является то, что к настоящему времени на целом ряде крупных судоходных рек России произошли значимые изменения руслового режима в результате разработки русловых карьеров нерудных строительных материалов и обусловленных этими мероприятиями врезания русел рек и понижения (посадки) уровня воды.

В работах (Беркович, 2005; Гладков и др., 2023) приведены результаты анализа гидрологического режима и трансформации русел рек Томи в районе г. Томска, Оки на участке г. Калуга – г. Рязань, Белой на участке г. Уфа – г. Бирск, Иртыша в районе г. Омска, Оби у г. Новосибирска, Вятки в районе г. Кирова. Добыча НСМ производится из русел многих других судоходных рек. Эти изменения негативно сказываются не только на судоходных качествах рек, но и в целом на условиях водопользования (на работе водозаборов, устойчивости инженерных объектов и т.д.), усугубляясь с течением времени из-за нарушения допустимых объемов добычи, игнорирования научно обоснованных и согласованных методических указаний.

Одним из основных возможных путей решения проблемы восстановления уровней воды в данном случае является строительство низконапорных гидроузлов (Гладков и др., 2018).

На зарегулированных участках рек основные затруднения для судоходства проявляются вследствие развития эрозионных процессов в нижних бьефах гидроузлов, не имеющих подпора от нижерасположенных водохранилищ. В границах Единой глубоководной системы европейской части РФ на сегодняшний день не обеспечиваются необходимые для судоходства глубины на р. Волге в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла, на участке р. Камы ниже Чайковского шлюза, на р. Дон в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла, на р. Волге ниже Волгоградского гидроузла. На ряде участков судоходных рек к настоящему времени ситуация стала критичной.

В настоящее время на р. Волге проводится реконструкция Городецких шлюзов для обеспечения судоходства на лимитирующем участке от створа Нижегородской ГЭС до г. Нижнего Новгорода; на р. Дон строится Багаевский низконапорный гидроузел. Возобновилось строительство Красногорского водоподъемного гидроузла на р. Иртыш в районе г. Омска. Рассматриваются возможные варианты для решения проблемы обеспечения судоходства на участке р. Камы от створа Воткинской ГЭС до п. Камбарки.

На Нижней Волге есть также ряд других затруднительных участков, в первую очередь – Саралевский узел (Чалов, Завадский, 2019), без решения проблемы которого вопрос эффективного использования воднотранспортного коридора на р. Волге остается открытым.

Красногорский водоподъемный гидроузел на реке Иртыш

Река Иртыш в своем верхнем течении на территории Республики Казахстан зарегулирована каскадом из трех гидроузлов – Бухтарминским, Усть-Каменогорским и Шульбинским. Бухтарминский гидроузел осуществляет многолетнее регулирование и является основным регулятором стока на р. Иртыш. Шульбинский гидроузел, являющийся последней на сегодняшний день ступенью Верхне-Иртышского каскада гидроузлов, расположен в 1094 км выше по течению от г. Омска. Его водохранилище с полезным объемом 1.47 км^3 осуществляет сезонное регулирование стока.

На участке от створа Шульбинской ГЭС до г. Омска естественная боковая приточность практически отсутствует. С конца XX в. и по настоящее время г. Омск находится в условиях дефицита водных ресурсов (Кожевников, Стазаева, 1983). Негативные последствия при этом проявляются в нарушении условий работы водозаборов и других инженерных коммуникаций, оголении свайных оснований гидротехнических сооружений, заболачивании и зарастании дна на мелководьях. Причинами низкой водности р. Иртыш в районе г. Омска являются отбор воды из р. Иртыш в границах Китайской Народной Республики и Республики Казахстан, изменение гидрологического режима р. Иртыш после ввода в эксплуатацию гидроузлов на верхнем Иртыше, а также хозяйственная дея-

тельность, включая добычу речного аллювия из русла реки в районе г. Омска.

Основной фазой водного режима р. Иртыш и ее притоков является весенне-летнее половодье, в период которого проходит в среднем 45% годового стока и формируются максимальные в году расходы и наивысшие уровни воды. Максимальные расходы воды чаще всего проходят в мае, средняя дата наступления максимальных расходов воды р. Иртыш – г. Омск приходится на третью декаду мая. Наивысшие уровни воды проходят в период весеннего половодья при свободном русле. Наивысший уровень воды составил 73.37 м БС, высший уровень ледохода составил 72.15 м БС. Низшие уровни отмечаются в период открытого русла (период летне-осенней межени) и в зимний период. Низший уровень р. Иртыш в створе г. Омска в период открытого русла составил 66.81 м БС, в зимний период – 66.73 м БС.

В целях устранения негативных последствий в периоды маловодья в 2008 г. было разработано Технико-экономическое обоснование мероприятий по регулированию стока р. Иртыш на территории Омской области (Орищук и др., 2024). В качестве основных способов регулирования стока было рассмотрено два основных варианта:

– строительство каскада низконапорных переливных плотин в пределах современного русла;

– водохранилище сезонного регулирования выше г. Омска и переливная плотина ниже г. Омска в Красногорском створе.

По результатам проработок в качестве приоритетного был рекомендован второй вариант, предусматривающий строительство водоподъемного гидроузла.

Схема компоновки основных сооружений Красногорского водоподъемного гидроузла показана на рис. 1.

Левобережная и правобережная водосливные плотины имеют по 6 пролетов по 16 м, пролеты перекрываются плоскими затворами. Отметка порога водосливных секций — 65.1 м БС. Максимальный напор на сооружения — 4.7 м. Камера шлюза имеет длину 150.0 м, ширину в свету 20.0 м и высоту стен от днища до верха парапета 14.9 ÷ 15.1 м. В поперечном сечении камера представляет собой конструкцию докового типа и запроектирована из монолитного железобетона. Шлюз имеет сосредоточенную (головную) систему питания. Наполнение и опорожнение камеры шлюза при принятом механическом оборудовании осуществляется с помощью обходных водопроводных галерей, расположенных в устоях голов.

Нормальный подпорный уровень (НПУ) проектируемого гидроузла принят на абсолютной отметке 70.0 м, форсированный подпорный уровень

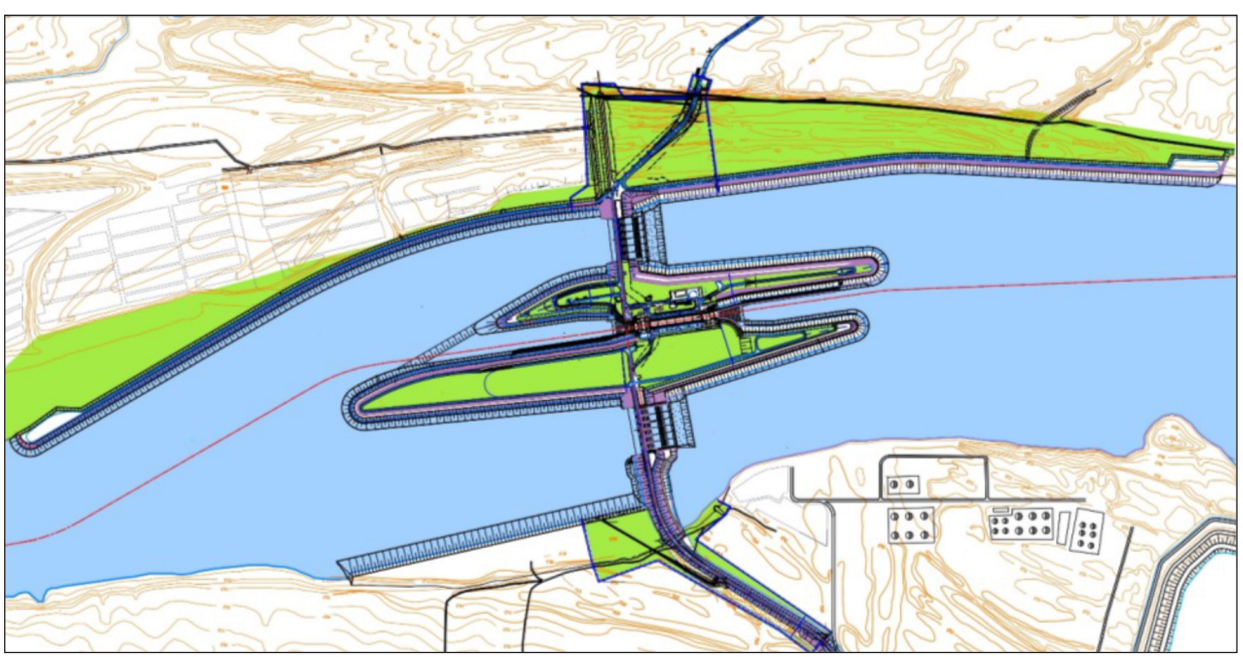


Рис. 1. Схема компоновки Красногорского гидроузла

Fig. 1. Layout diagram of Krasnogorsk hydroelectric complex

(ФПУ) – на абсолютной отметке 74.3 м. Уровень нижнего бьефа принимается равным 66.7 м.

При строительстве и дальнейшей эксплуатации Красногорского гидроузла произойдет изменение гидравлических характеристик русла, изменится скоростной режим потока, а также характер и интенсивность русловых переформирований, как в верхнем бьефе, так и в нижнем бьефе гидроузла. При содержании судовых ходов после ввода гидроузла в эксплуатацию потребуется осуществлять мониторинг руслового режима в зоне влияния подпорных сооружений.

Реконструкция Городецких шлюзов на реке Волге

Первые проблемы, связанные с обеспечением судоходства в нижнем бьефе Городецких шлюзов, начали проявляться уже в конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века. Это было связано с тем, что вследствие развития эрозионных процессов на участке р. Волги, расположенном выше границы зоны выклинивания подпора от Чебоксарского водохранилища, а также в результате проведения дноуглубительных работ на судоходном фарватере и разработки русловых карьеров в русле реки отметки уровня воды в нижнем бьефе гидроузла стали понижаться. В настоящее время величина снижения уровня воды на пороге нижней ступени Городецких шлюзов оценивается величиной порядка 130–150 см, что привело к существенному ограничению транзитного судоходства с использованием крупнотоннажного флота на данном участке Единой глубоководной системы европейской части России.

Возможны два основных пути решения рассматриваемой проблемы обеспечения судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на р. Волге (Гладков и др., 2021). Первый из них, который гарантированно решает проблемы судоходства и обеспечивает сохранность в эксплуатации всех существующих объектов инфраструктуры водного транспорта, заключается в создании дополнительного подпора в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла.

В соответствии с принятым ранее отрицательным решением по вопросу реконструкции Чебоксарского гидроузла, в составе т.н. «Проекта 68», предусматривающего наполнение Чебоксарского водохранилища до отметки 68.0 м БС, в данном случае речь идет о возможности создания подпора на проблемном для судоходства участке р. Волги путем строительства низконапорного гидроузла в районе пос. Большое Козино. Для низконапорного гидроузла (ННГу) были выполнены необходимые инженерно-гидрометеорологические изыскания и разработана проектная документация, которая получила в результате отрицательное заключение государственной экспертизы.

В связи с выявленными многочисленными экологическими, социальными и техногенными рисками (Родионов и др., 2022) данный проект в настоящее время не может быть рекомендован для реализации на практике без существенной переработки и изменения ряда основных проектных решений.

Альтернативное решение проблемы судоходства на данном участке заключается в строительстве дополнительного судопропускного сооружения с пониженным порогом и днищем камеры в нижнем бьефе гидроузла. Кроме этого, для обеспечения судоходства от Городца до Нижнего Новгорода необходимо создать в русле р. Волги судоходный канал – дноуглубительную прорезь на участке от Городецких шлюзов до границы зоны выклинивания подпора от Чебоксарского водохранилища.

В качестве основных вариантов, альтернативных строительству ННГу, рассматривались следующие предложения:

– строительство третьей нитки шлюзов нижней ступени Городецких шлюзов с пониженным заложением порога;

– строительство в составе Городецких шлюзов дополнительной камеры шлюза № 15А.

В соответствии с принятым решением в настоящее время в рамках проекта реконструкции Городецких шлюзов на р. Волге реализуется второй вариант, предусматривающий строительство дополнительной камеры судоходного шлюза и создание судоходного канала в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на свободном от подпора участке р. Волги.

Проблему обеспечения судоходства на участке р. Волги, расположенном ниже Городца, целесообразно решать совместно с проведением оптимизации стока Рыбинского и Горьковского водохранилищ, в том числе путем увеличения сбросных расходов в нижний бьеф Нижегородской ГЭС до 1300 м^3/с.

Обеспечение условий судоходства на Нижнем Дону

Транспортное гидротехническое строительство в интересах водного транспорта в бассейне Нижнего Дона началось более ста лет назад, в первом десятилетии XX в. Современное состояние руслового режима р. Нижний Дон характеризуется тем, что к настоящему времени произошло необратимое понижение отметок дна и уровней воды. Эти изменения связаны со строительством и последующей

эксплуатацией каскада гидроузлов на Нижнем Дону (Гладков и др., 2017), а также с проведением в русле реки дноуглубительных работ по обеспечению судоходных условий и работ по добыче нерудных материалов.

Имеющиеся данные показывают, что снижение уровней воды проявилось по всей длине судоходного участка, однако величина понижения бытовых отметок уменьшается вниз по течению реки по мере удаления от Кочетовского гидроузла. В нижнем бьефе Кочетовского гидроузла величина понижения уровня воды при расходе воды 95% обеспеченности в навигационный период составляет, по предварительной оценке, около 180–190 см. В створе Раздорского гидрологического поста уровни воды при таком расходе понизились на величину 120–140 см. На нижерасположенном Багаевском посту снижение составило около 60 см.

В современных условиях транспортная система Нижнего Дона является одним из самых грузонапряженных участков внутренних водных путей Российской Федерации. Наибольшие затруднения для судоходства представляет участок реки от Кочетовского гидроузла до устья притока Дона – р. Маныч. Колебание уровней воды в навигационный период может достигать 1.5 м и в значительной степени зависит от боковой приточности, а также ветровых сгонно-нагонных явлений.

В целях повышения транспортной доступности и улучшения условий работы водохозяйственного комплекса Донского региона, а также обеспечения надежности и безопасности судоходства крупнотоннажного флота на Нижнем Дону в настоящее время ведется строительство низконапорного Багаевского гидроузла. Створ гидроузла расположен на 4.4 км ниже устья притока Дона – р. Маныч. Ширина судоходной части русла реки в створе составляет около 210 м. В створ гидроузла попадают остров Арпачинский (Белый) и левый рукав р. Дон шириной около 160 м.

Русловые переформирования в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла исследовались в нескольких аспектах (Гладков и др., 2018), включая анализ плановых и высотных переформирований на анализируемом участке р. Нижний Дон. Основные затруднения для судоходства в подпорных условиях, после реализации проекта Багаевского гидроузла, возможны в верхней части участка, вблизи границы зоны выклинивания подпора.

Исследования, выполненные в ходе проектных и изыскательских работ (Гладков и др., 2018), позволили получить детальную информацию о реальных изменениях гидрологического и руслового режимов Нижнего Дона, которые произошли к настоящему времени в результате эксплуатации каскада вышерасположенных гидроузлов и осуществления хозяйственной деятельности в бассейне реки. Материалы исследований позволили установить проектные характеристики создаваемого водохранилища, а также получить рекомендации по проблеме восстановления водного режима на Нижнем Дону.

В качестве аппарата исследований в работе использовались результаты математического и гидравлического моделирования проектируемых сооружений. Гидравлические расчеты выполнялись с использованием 2D – гидродинамической модели, основанной на решении методом конечных элементов системы уравнений движения и неразрывности в приближении мелкой воды.

Современный аппарат позволяет с достаточной степенью надежности решать задачи о распределении средних на вертикали скоростей течения в речных потоках и моделировать влияние проектируемых мероприятий на скоростной режим и уровни воды.

В процессе разработки проекта Багаевского гидроузла были проведены экспериментальные исследования на пространственной гидравлической модели участка р. Дон и сооружений Багаевского гидроузла, построенной в масштабе 1:100 в Русловой гидравлической лаборатории Государственного гидрологического института. Для строительства пространственной гидравлической модели участка р. Дон были использованы материалы инженерных изысканий и проектные решения по основным сооружениям Багаевского гидроузла. Общий вид гидравлической модели показан на рис. 2.

Гидравлические исследования на модели проводились для нескольких вариантов состояния русла, соответствующих различным этапам строительства запроектированных сооружений. Анализ материалов гидравлических исследований на модели Багаевского гидроузла позволил подтвердить высокую эффективность и обоснованность основных проектных инженерных решений и внести отдельные корректировки, способствующие повышению безопасности и надежности его работы.

ГИДРАВЛИКА ПОТОКА В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГИДРОУЗЛОВ

Исследования гидравлических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов стали проводиться в первой половине прошлого столетия одновременно с началом активного гидротехнического строительства. В монографиях (Исследования..., 1963; Розовский и др., 1967; Грушевский, 1982), посвященных изучению неустановившегося

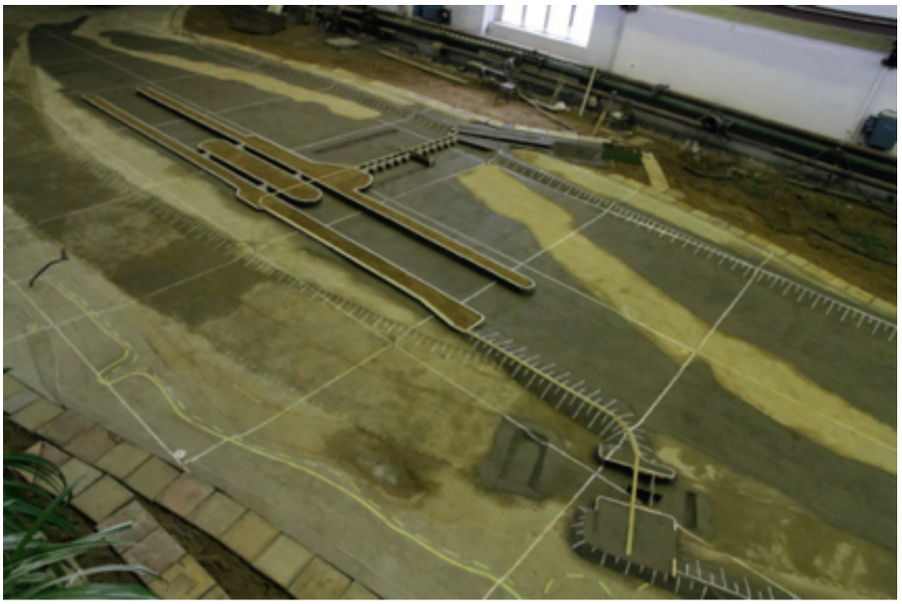


Рис. 2. Общий вид гидравлической модели Багаевского гидроузла на р. Дон

Fig. 2. General view of the hydraulic model of the Bagaevsky hydroelectric complex on the Don river

движения воды в реках, приведены сведения о том, что при прохождении волн попусков в нижних бьефах гидроузлов нарушается однозначная связь между расходами и уровнями воды. По мере своего удаления от створа гидроузла вниз по течению реки волна попуска распластывается, в результате чего амплитуды изменения величины попускового расхода воды и высоты волны попуска по длине реки уменьшаются. При прохождении волны попуска эпюра распределения скорости течения воды по вертикали трансформируется; причем наиболее сильные изменения в кинематике потока наблюдаются в непосредственной близости от створа гидроузла.

Проведенные исследования (Graf, Suszka, 1985; Graf, 1998; Mrokowska, Rowinski, 2019; Wang et al., 2019; Marian Muste et al., 2020) позволили в целом изучить особенности гидравлики потока при меняющемся во времени расходе воды. Было установлено, что при неустановившемся движении воды две переменные потока (уровень и расход воды) различны для восходящей и нисходящей части попусковой волны; пики переменных характеристик потока не совпадают и распределены по времени в следующем порядке: уклон свободной поверхности воды, средняя скорость в поперечном сечении, расход воды и уровень воды. Каких-либо определенных данных о динамике грядового рельефа в условиях неустановившегося движения воды в этих работах не приводится.

Исследования гидрологического режима в нижних бьефах ряда гидроузлов на крупных судоходных реках, а также выполнение численных экспериментов по оценке гидравлических характеристик речного потока и параметров транспорта наносов по данным почасовых наблюдений за сбросными расходами и уровнями воды позволили выявить особенности движения наносов при неустановившемся течении воды и получить определенные рекомендации для установления граничных условий при моделировании русловых переформирований в реках (Гладков, Ржаковская, 2023; Гладков и др., 2023; Гладков, Католиков, 2023; Gladkov G. et al., 2024).

Анализ хода уровней воды в нижних бьефах гидроузлов показал, что в многолетнем разрезе на гидрологических постах Нижний бьеф ГЭС, г. Городец и г. Балахна на р. Волге отчетливо прослеживается тренд на понижение минимальных уровней воды за весь период наблюдений. Со времени ввода в эксплуатацию сооружений Чебоксарского гидроузла минимальные навигационные уровни в нижнем бьефе гидроузла понижались со средней интенсивностью 1.7–1.8 см/год; начиная с 2006 г. этот процесс ускорился, и средняя интенсивность снижения уровней воды составила 2.5–3.2 см/год.

В нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС – на верховом участке Куйбышевского водохранилища – ситуация с минимальными навигационными уровнями воды не такая критичная. Снижение уровней воды в нижнем бьефе гидроузла за период последнего маловодья происходит в среднем на величину около 1.2 см за год. В свою очередь, в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС, являющейся нижним (замыкающим) сооружением Волжско-Камского каскада гидроузлов на Волге, средняя величина понижения минимальных уровней воды составляет около 1.7 см за год. В настоящее время проектные уровни воды в нижнем бьефе

гидроузла гарантируются при расходах воды через Волгоградский гидроузел не менее 5000 м^3/с.

Результаты анализа гидравлических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов показали, что при суточном регулировании стока скорость течения в нижнем бьефе значительную часть времени в течение каждых суток и навигации в целом оказывается меньше неразмывающей скорости, а во время прохождения волны попуска превышает ее. Это свидетельствует о том, что в моменты попуска на участке будет иметь место транспорт наносов, а после прохождения волны попуска движение наносов приостанавливается.

В результате суточного регулирования стока скорости течения воды изменяются в достаточно большом диапазоне значений. Минимальные значения скорости течения воды в живом сечении отвечают моменту окончания сбросного попуска воды на гидроузле. Далее, несмотря на продолжающееся понижение уровней воды в створе поста, скорость течения начинает возрастать с небольшой интенсивностью при минимальном сбросном расходе воды до момента наступления самого низкого уровня воды на гидростворе. С этого момента начинается новый попуск воды, и скорость течения воды интенсивно возрастает до своего максимального значения. Своего максимума сбросной расход воды достигает несколько позже по времени.

В естественных русловых потоках с подвижным дном характеристики грядового рельефа дна – размеры гряд и скорость их перемещения – определяются скоростью течения воды и глубиной потока. Численные эксперименты (Гладков, Ржаковская, 2023; Гладков и др., 2023; Гладков, Католиков, 2023; Gladkov G. et al., 2024) показали, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны сбросного попуска воды из верхнего бьефа гидроузла. При этом основные параметры транспорта наносов – скорость перемещения гряд и расход наносов – возрастают по сравнению со стационарным течением воды. Определяющим фактором русловых переформирований в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками воды.

Результаты численных экспериментов, выполненных для трех гидроузлов, показали, что при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла средний за сутки расход наносов возрастает в 2 раза и более по сравнению с аналогичными данными при установившемся движении воды при равных значениях среднесуточных расходов воды за расчетный период времени. Полученные результаты далее были проверены в ходе экспериментальных исследований в гидравлическом лотке.

Для апробации результатов численного моделирования (Гладков и др., 2024) был выполнен анализ имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных, а также проведены новые эксперименты в гидравлическом лотке с песчаным дном. Исследования проводились на Главной экспериментальной базе ГГИ в гидравлическом лотке длиной 8.0 м и шириной 0.21 м.

Лоток оборудован устройствами для изменения уклона дна в диапазоне значений: прямой – до 0.025, обратный – до 0.015, а также для автоматического воспроизведения гидрографа стока по заданной программе. Расходы в экспериментах изменялись в диапазоне от 2.0 до 6.0 л/с. В качестве руслового материала использовался кварцевый песок диаметром от 0.1 до 0.3 мм. Основные технические характеристики гидравлического лотка приведены в работе (Клавен, Копалиани, 2011).

На подготовительном этапе работы было выполнено семь циклов экспериментов при установившемся расходе воды в диапазоне его значений от 2.9 до 6.0 л/с. В каждом цикле исследований на дне лотка формировался устойчивый грядовый рельеф дна с глубиной потока в диапазоне значений от 5.2 до 8.8 см, величина которой устанавливалась в лотке в зависимости от подаваемого расхода воды. В ходе проведения каждого цикла экспериментов измерялись размеры гряд на дне лотка и скорости их перемещения, уклоны свободной поверхности, а также скорости течения воды в лотке в различных точках по глубине потока.

Расход наносов в лотке вычислялся по параметрам донных гряд. Для контроля величины твердого стока дополнительно измерялась величина выноса перемещаемых наносов с помощью специальной ловушки, расположенной в концевой части лотка. Гидравлические характеристики потока и параметры гряд при неустановившемся движении воды были измерены в трех циклах экспериментов при трапецеидальном гидрографе попуска воды.

Экспериментальные исследования подтвердили результаты численных экспериментов.

Анализ результатов проведенных исследований (Гладков, Ржаковская, 2024) позволил сформулировать особенности движения наносов при неустановившемся течении воды. Определяющим фактором в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками.

ВЫВОДЫ

Гидроморфологический режим судоходных рек в настоящее время в значительной степени подвержен влиянию антропогенных и климатообусловленных факторов. Повышение значений среднегодовой температуры в речных бассейнах привело к изменению характеристик речного стока и сказалось на изменении водного и ледового режимов. Нарушение условий формирования и прохождения весенних паводков привело к изменению характера и интенсивности сезонных переформирований перекатов.

На свободных реках антропогенные изменения руслового режима обусловлены в основном добычей нерудных строительных материалов из русел рек, которая в прежние годы осуществлялась повсеместно и в значительных объемах. В результате на отдельных участках рек большого протяжения произошло эрозионное врезание русел и понизились меженные уровни воды.

Эрозионные процессы наблюдаются также и в нижних бьефах гидроузлов. Исследования, проведенные на Нижегородском, Чебоксарском, Волгоградском гидроузлах на р. Волге, а также на ряде других гидроузлов на крупных судоходных реках, позволили установить устойчивые однонаправленные тренды на понижение минимальных уровней воды. Наиболее сильные изменения уровней воды происходят в нижних бьефах гидроузлов, не имеющих подпора со стороны нижерасположенных водохранилищ.

Происходящие изменения руслового режима на судоходных реках негативно сказались на условиях содержания судовых ходов. На отдельных участках внутренних водных путей снижение меженных уровней воды стало критическим с точки зрения обеспечения безопасности судоходства, что обусловило необходимость проведения реконструкции существующих судопропускных сооружений и строительства дополнительных низконапорных гидроузлов.

Натурные и экспериментальные исследования гидравлики потока в нижних бьефах гидроузлов показали, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны суточного попуска воды из верхнего бьефа гидроузла. При этом основные параметры транспорта наносов – скорость перемещения гряд и расход наносов – возрастают по сравнению со стационарным течением воды. Степень увеличения расхода наносов при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла зависит от неравномерности регулирования стока воды (параметров входного гидрографа), удаления расчетного гидроствора от створа плотины, а также от характера изменения водности в течение навигации.

Прогноз русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов при неустановившемся движении воды представляется сложной задачей и требует проведения дополнительных натурных и экспериментальных исследований. Новые результаты, полученные в данной области исследования, позволят улучшить практику гидравлических расчетов гидродинамических характеристик речного потока при обосновании путевых мероприятий на судоходных реках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р.

Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.

Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // Тезисы пленар. докладов VII Всеросс. гидрол. съезда. СПб.: Гидрометеоиздат, 2013. С. 26–32.

Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В. и др. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.

Беркович К.М. Русловые процессы и русловые карьеры. М.: МГУ. 2005. 105 с.

Гладков Г.Л., Чалов Р.С., Беркович К.М. Гидроморфология русел судоходных рек. 4-е изд., стер. СПб.: Лань. 2023. 432 с.

Гладков Г.Л., Католиков В.М., Шурухин Л.А. Строительство низконапорных гидроузлов на судоходных реках // Транспорт РФ. 2018. № 5 (78). С. 39–42.

Чалов Р.С., Завадский А.С. Саралевский воднотранспортный узел и проблемы улучшения судоходных условий на нижней Волге // Речной транспорт (XXI век). 2019. № 4 (92). С. 20–23.

Кожевников В.С., Стазаева Н.А. Анализ снижения уровня воды вследствие преобразования русла р. Иртыш у г. Омска под влиянием хозяй-

ственной деятельности. Труды ГГИ, вып. 288. 1983. С. 96–105.

Орищук Р.Н., Обоймов С.В., Орхидеева О.Г. Особенности проектирования и строительства Красногорского водоподъемного гидроузла на реке Иртыш // Проблемы строительства и гидравлики гидротехнических сооружений: сб. мат. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2024. С. 90–96.

Гладков Г.Л., Моргунов К.П., Гарибин П.А. Гидроморфологический режим и судоходные условия в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: Сб. науч. тр.: Вып. 5. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2021. С. 10–27.

Родионов А.А., Румянцев В.А., Фёдоров М.П. и др. Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 109–131.
doi: 10.48612/fpg/abfh-m2n7–9mn6

Гладков Г.Л., Каторликов В.М., Шурухин Л.А. Обеспечение судоходных условий на нижнем Дону. Сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории имени профессора В.Е. Тимонова. Т. 1. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2017. С. 196–216.

Исследования неустановившегося движения воды на реке Свири в зимних и летних условиях. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 252 с.

Розовский И.Л., Еременко Е.В., Базилевич В.А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. Киев: Наукова думка. 1967. 276 с.

Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л.: Гидрометеоиздат. 1982. 288 с.

Graf W., Suszka L. Unsteady flow and its effect on sediment transport [Paper presentation]. 21st IAHR Congress, 13–18 August 1985, Melbourne, Australia. 1985.

Graf W.H. Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry. Chichester. New York: Wiley. 1998.

Mrokowska M., Rowinski P. Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments // Water. 2019. No 11(5). 2019. 907 p.

Wang L., Cuthbertson A., Pender G., Zhong D. Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs // Water Resources Research. 2019. No 55(7). P. 5431–5452.

Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng, Felipe Quintero. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows // Journal of Hydraulic Research. 2020. No 58:6. P. 867–887

Гладков Г.Л., Ржаковская П.С. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2023. Т. 15. № 3. С. 344–358.

Гладков Г.Л., Каторликов В.М., Ржаковская П.С. Гидравлика потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. Вып. 6. Ч. 1. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2023. С. 24–43.

Гладков Г.Л., Каторликов В.М. Гидроморфологическое обоснование судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге // Тридцать восьмое пленар. межвуз. координац. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Доклады и сообщения. Пермь. 2023. С. 27–42.

Gladkov G. et al. Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River // International Journal of Sediment Research,
https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.01.004.

Гладков Г.Л., Ржаковская П.С., Заварзин Р.В. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустановившемся движении воды // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2024. Т. 16. № 2. С. 181–196.

Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История. 2011. 544 с.

Гладков Г.Л., Ржаковская П.С. Гидравлика речного потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках // Эрозия почв и русловые процессы. М.: НИЛ ЭПиРП. 2024. № 1. С. 70–83.

ОБ АВТОРЕ

Гладков Геннадий Леонидович, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных путей и водных изысканий. Сл. адрес: 198035, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. E-mail: gladkovgl@gumrf.ru

INLAND WATERWAYS OF RUSSIA: PROBLEMS OF HYDROLOGICAL REGIME AND CHANNEL PROCESSES ON FREE AND REGULATED RIVERS

G.L. Gladkov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia
gladkovgl@gumrf.ru

Abstract: In modern conditions, when maintaining ship passages on inland waterways, it is necessary to take into account the natural course of the development of the channel process, seasonal and long-term deformations of channels, climatically conditioned changes in the characteristics of river flow, as well as anthropogenic changes in the water and channel regimes of ship rivers. The latter factor is manifested both as a result of engineering (technogenic) impact, as well a result of regulation of river runoff by hydroelectric facilities. Studies have shown that to date, in a number of sections of large navigable rivers of Russia, for these reasons, erosion cutting of channels and an irreversible decrease in low-water levels have occurred. In some sections of waterways, these changes became critical safe navigation, which required the reconstruction of existing ship-passing hydraulic structures and the construction of new low-pressure hydroelectric structures. Currently, the Gorodetsky locks are being reconstructed on the Volga River to ensure navigation on the limiting section from the target of the Nizhny Novgorod hydroelectric station to Nizhny Novgorod; Bagaevsky low-pressure hydroelectric complex is being built on the Don. The construction of the Krasnogorsk water-lifting hydroelectric complex on the Irtysh in the Omsk region has resumed. Possible options are being considered to solve the problem of ensuring navigation on the Kama River section from the Votkinskaya hydroelectric station to Kambarka. Studies of the speed regime of the river flow, carried out in the lower reaches of hydroelectric facilities, showed that with unsteady water movement in the lower reach, there is an activation of sediment transport, both in the summer observation period – in an open channel, and in winter, when water moves under ice.

Keywords: morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water discharge, sediment transport, sediment discharge, parameters of dunes, channel transformations

REFERENCES

Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda, utverzhdyonnaya rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27.11.2021 № 3363-r.

Georgievskij V.Yu., Shalygin A.L. Gidrologicheskij rezhim i vodnye resursy // Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskih i biologicheskih sistem. M.: Rosgidromet, 2012. S. 53–86.

Georgievskij V.Yu., Koronkevich N.I., Alekseevskij N.I. Vodnye resursy i gidrologicheskij rezhim rek RF v usloviyah izmeneniya klimata // Tezisy plenar. dokladov VII Vseross. gidrol. s»ezda. SPb.: Gidrometeoizdat, 2013. S. 26–32.

Gel'fan A.N., Frolova N.L., Magrickij D.V. i dr. Vliyanie izmeneniya klimata na godovoj i maksimal'nyj stok rek Rossii: ocenka i prognoz // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2021. T. 7. № 1. S. 36-79.

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshchee rezyume. SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2022. 124 s.

Berkovich K.M. Ruslovye processy i ruslovye kar'ery. M.: MGU. 2005. 105 s.

Gladkov, G.L., Chalov R.S., Berkovich K.M. Gidromorfologiya rusel sudohodnyh rek.4-e izd., ster. SPb.: Lan'. 2023. 432 s.

Gladkov G.L., Katolikov V.M., Shuruhin L.A. Stroitel'stvo nizkonapornyh gidrouzlov na sudohodnyh rekah // Transport RF. 2018. № 5 (78). S. 39–42.

Chalov R.S., Zavadskij A.S. Saralevskij vodnotransportnyj uzel i problemy uluchsheniya sudohodnyh uslovij na nizhnej Volge // Rechnoj transport (XXI vek). 2019. № 4 (92). S. 20- 23.

Kozhevnikov V.S., Stazaeva N.A. Analiz snizheniya urovnya vody vsledstvie preobrazovaniya rusla r. Irtysha u g. Omska pod vliyaniem hozyajstvennoj deyatel'nosti. Trudy GGI, vyp. 288. 1983. S. 96-105.

Orishchuk R.N., Obojmov S.V. Orhideeva O.G. Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva Krasnogorskogo vodopod'yomnogo gidrouzla na reke Irtysh // Problemy stroitel'stva i gidravliki gidrotekhnicheskih sooruzhenij: sb. mat. nauch.- prakt. konf. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2024. S. 90–96.

Gladkov G.L., Morgunov K.P., Garibin P.A. Gidromorfologicheskij rezhim i sudohodnye usloviya v nizhnem b'efe Nizhegorodskogo gidrouzla na reke Volge

// Vodnye puti i ruslovye processy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnyh putej: Sb. nauch. tr.: Vyp. 5. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2021. S. 10–27.

Rodionov A.A., Rumyancev V.A., Fyodorov M.P. i dr. Varianty resheniya problem sudohodstva na limitirovannom uchastke reki Volgi ot Gorodeckogo gidrouzla do Nizhnego Novgoroda, v tom chisle s uchetom ocenki vliyaniya na sanitarno-epidemiologicheskuyu i ekologicheskuyu situaciyu v regione // Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika. 2022. T. 15. № 4. S. 109–131. doi:10.48612/fpg/abfh-m2n7–9mn6

Gladkov G.L., Katolikov V.M., Shuruhin L.A. Obespechenie sudohodnyh uslovij na nizhnem Donu. Sbornik materialov yubilejnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvyashchennoj 110-letiyu sozdaniya gidrotekhnicheskoj laboratorii imeni professora V.E. Timonova. Tom 1.- SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. S. 196–216.

Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody na reke Sviri v zimnih i letnih usloviyah. L.: Gidrometeoizdat, 1963. 252 s.

Rozovskij I.L., Eremenko E. V., Bazilevich V.A. Neustanovivsheesya dvizhenie vodnogo potoka nizhe gidroelektrostancij i ego vliyanie na ruslo. Kiev: Naukova dumka. 1967. 276 s.

Grushevskij M. S. Neustanovivsheesya dvizhenie vody v rekah i kanalah. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 288 s.

Graf W., Suszka L. Unsteady flow and its effect on sediment transport [Paper presentation]. 21st IAHR Congress, 13–18 August 1985. Melbourne, Australia. 1985.

Graf W.H. Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry. Chichester. New York: Wiley. 1998.

Mrokowska M., Rowinski P. Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments // Water. 2019. No 11(5). 2019. 907 p.

Wang L., Cuthbertson A., Pender G., Zhong D. Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs // Water Resources Research. 2019. No 55(7). P. 5431–5452.

Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng, Felipe Quintero. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows // Journal of Hydraulic Research. 2020. No 58:6. P. 867–887

Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S. Gidravlicheskie harakteristiki rechnogo potoka i usloviya transporta nanosov v nizhnem b'efe gidrouzla // Vest. Gos. un-ta morskogo i rechnogo flota im. adm. S. O. Makarova. 2023. T. 15. № 3. S. 344–358.

Gladkov G.L., Katolikov V.M., Rzhakovskaya P.S. Gidravlika potoka i parametry transporta nanosov pri neustanovivshemsya dvizhenii vody v nizhnih b'efah gidrouzlov na sudohodnyh rekah // Vodnye puti i ruslovye processy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnyh putej. Vyp. 6. Ch. 1. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2023. S. 24–43.

Gladkov G.L., Katolikov V.M. Gidromorfologicheskoe obosnovanie sudohodstva v nizhnem b'efe Nizhegorodskogo gidrouzla na reke Volge // Tridcat' vos'moe plenar. mezhvuz. koordinac. soveshch. po probleme erozionnyh, ruslovyh i ust'evyh processov. Doklady i soobshcheniya. Perm'. 2023. S. 27–42.

Gladkov G. et al. Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River // International Journal of Sediment Research, https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.01.004.

Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S., Zavarzin R.V. Eksperimental'nye issledovaniya gidravliki potoka i parametrov transporta donnyh nanosov pri neustanovivshemsya dvizhenii vody // Vestn. Gos. Un-ta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova. 2024. T. 16. № 2. S. 181-196.

Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlicheskoe modelirovanie rechnyh potokov i ruslovogo processa. SPb.: Nestor-Istoriya. 2011. 544 s.

Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S. Gidravlika rechnogo potoka i parametry transporta nanosov pri neustanovivshemsya dvizhenii vody v nizhnih b'efah gidrouzlov na sudohodnyh rekah // Eroziya pochv i ruslovye processy. M.: NIL EPiRP. 2024. № 1. S. 70–83.

ABOUT THE AUTHOR

Gladkov Gennady Leonidovich, Admiral S.O. Makarov GUMRF. Doctor of technical sciences, Professor. Head of the Department of Waterways and Water Surveys. Office address: 198035, Russian Federation, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7

e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
№ 2. 2025

Формат обрезной 204х285
Объем 80 с.
Бумага офсетная
Печать цифровая
Тираж 25 экз.