



ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

SOIL EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES

№ 1

январь – март 2026

No. 1

January – March 2026

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК: «Ведущие научные школы
в области изучения эрозионных и русловых процессов»
ЧАСТЬ 2**

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. М. – 2026. – № 1. – 106 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, исполняющий обязанности 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)

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

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. Шлетгерер**, институт гидробиологии и управления водными экосистемами, Университет природных ресурсов и наук о жизни, профессор (г. Вена, Австрия)

КООРДИНАТОР РЕДАКЦИИ

канд. геогр. наук **А.С. Чалова**, 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: Излучина р. Тыхаи, ЯНАО. Фото **Екатерины Крастынь**, аспирантки кафедры гидрологии суши географического факультета 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/>

УЧРЕДИТЕЛИ

Общество с ограниченной ответственностью «Экспертная лаборатория «Гидроинформационные системы»
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Издательство «Наука»

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБУ «Издательство «Наука», 121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

- © Редколлегия журнала «Эрозия почв и русловые процессы» (составитель), 2026
- © ООО «Экспертная лаборатория «Гидроинформационные системы», 2026

ISSN (PRINT) 3034-4638

Журнал основан в 2024 году
Периодичность издания — 4 раза в год

SOIL EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES. M. – 2026. – No. 1. – 106 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, Dr. A.S. Zavadsky,
Dr. A.P. Zhidkin, Prof. Dr. M. Zlatic (Serbia)

BOARD COORDINATOR

Dr. A.S. Chalova

EDITOR-PROOFREADER R.M. Sinaiuk

ORIGINAL LAYOUT AND DESIGN L.V. Ezerova

PHOTO ON THE 1ST COVER & pages 1, 6, 7 – Bend of the Tyyakha River, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.
Photo by Ekaterina Krastyn, PhD student of the Department of Hydrology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University

POSTAL ADDRESS

119619 Russia, Moscow, 6th Lazenki Street, 2, Bldg. 15

E-mail: eprp@geogr.msu.ru

Publisher office: 121099, Russia, Moscow, 6 Shubinsky per., build. 1

<https://journal.sediment.ru/>

FOUNDERS

Limited Liability Company “Expert Laboratory “Hydroinformational Systems”,
Federal institution “Nauka Publishing house”

PUBLISHER OFFICE: 121099, Russia, Moscow, 6 Shubinsky per., build. 1

© Editorial Board of the journal “Soil Erosion and River
Channel Processes” (issuer), 2026

© Expert Laboratory “Hydroinformational Systems” LLC, 2026

ISSN (PRINT) 3034-4638

The journal was founded in 2024
Published 4 times a year

ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Первый номер нашего журнала за 2026 год завершает специальный выпуск **«Ведущие научные школы в области изучения эрозионных и русловых процессов»**. Статьи, представленные в этом номере, в основном посвящены исследованиям русловых процессов в нашей стране. Две из них отражают разнообразные аспекты научной школы, развиваемой в лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, — обзорная статья о деятельности лаборатории, описывающая основные направления исследований в области водосборных и русловых процессов, и отдельно — о школе географического русловедения (статья Р.С. Чалова). Еще одна статья подготовлена коллективом лаборатории русловых процессов Государственного гидрологического института, и наконец, заключительная статья — коллективом воднотранспортных вузов (Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова и Волжского государственного университета водного транспорта). Две последние статьи содержат примеры решения конкретных исследовательских задач, а не обзор всей научной школы.

Интересно, что как раз в дни утверждения номера Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова отмечает свой 150-летний юбилей, при этом организации, занимающиеся внутренними водными путями, были созданы еще раньше — в 1809 году: тогда, 217 лет назад, появился Институт Корпуса водяных и сухопутных сообщений. Поэтому с удовольствием поздравляем крупнейшее в нашей стране научно-образовательное воднотранспортное учреждение.

*Профессор кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
д.г.н., заведующий НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева*

С.Р. Чалов



СОДЕРЖАНИЕ

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК: «ВЕДУЩИЕ НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ЭРОЗИОННЫХ И РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ» (ЧАСТЬ 2)

- С.Р. Чалов, В.Н. Голосов, А.С. Завадский, В.В. Сурков, А.И. Иннокентьев,
А.А. Куракова** **8**
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННО-РУСЛОВЫХ СИСТЕМ В XXI ВЕКЕ:
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ
- Д.А. Щеглов, В.М. Католиков** **45**
РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ СУДОХОДНЫХ
УСЛОВИЙ НА Р. ИРТЫШ В РАЙОНЕ Г. СЕМЕЙ НА ОСНОВЕ
ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
- Г.Л. Гладков, П.В. Беляков, А.О. Еремеева, А.Н. Ситнов, Ю.Е. Воронина** **58**
ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА СРЕДНЕЙ И НИЖНЕЙ ВОЛГЕ С
УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
РЕЧНОГО СТОКА
- Р.С. Чалов** **89**
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОГРАФО-ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО
НАПРАВЛЕНИЯ В УЧЕНИИ О РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ
(ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ РУСЛОВЕДЕНИЕ): ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ



CONTENTS

SPECIAL ISSUE: «LEADING SCIENTIFIC SCHOOLS IN THE FIELD OF STUDYING EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES» (PART 2)

- S.R. Chalov, V.N. Golosov, A.S. Zavadsky, V.V. Surkov, A.I. Innokentyev,
A.A. Kurakova** 8
RESEARCH OF CATCHMENT EROSION-FLUVIAL SYSTEMS IN
THE 21ST CENTURY: MODERN TECHNOLOGIES AND RESULTS
- D.A. Shcheglov, V.M. Katolikov** 45
IMPROVEMENT OF NAVIGATION CONDITIONS ON THE
IRTYSH RIVER IN THE SEMEY AREA BASED ON HYBRID
MODELING
- G.L. Gladkov, P.V. Belyakov, A.O. Ereemeeva, A.N. Sitnov, Yu.E. Voronina** 58
HYDROMORPHOLOGICAL REGIME AND PROVISION OF
NAVIGABLE CONDITIONS ON THE MIDDLE AND LOWER
VOLGA, TAKING INTO ACCOUNT CLIMATIC AND
ANTHROPOGENIC CHANGES
- R.S. Chalov** 89
THE CURRENT STATE OF THE GEOGRAPHIC-HYDROLOGICAL
APPROACH IN THE STUDY OF CHANNEL PROCESSES
(GEOGRAPHICAL CHANNEL STUDY): THEORY AND
METHODOLOGY

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННО-РУСЛОВЫХ СИСТЕМ В XXI ВЕКЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

С.Р. Чалов*, В.Н. Голосов, А.С. Завадский, В.В. Сурков, А.И. Иннокентьев,
А.А. Куракова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет

*srchalov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 20.03.2026

После доработки 15.04.2026

Принята к публикации 23.04.2026

Аннотация. Эрозионно-аккумулятивная деятельность водных потоков происходит в разных пространственных масштабах на разных уровнях эрозионно-русловых систем (ЭРС). В статье приводятся основные результаты исследований, выполнявшихся представителями научной школы НИИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова, посвященных основным компонентам ЭРС — склонам и междуречьям, речным долинам и руслам, а также стоку наносов, связывающему эти разобщенные в пространстве элементы речного бассейна между собой. Каждое из направлений охарактеризовано с точки зрения наиболее актуальных технологий — физических моделей и моделей долевого вклада, балансовых подходов применительно к междуречьям; методов гидродинамического моделирования русловых потоков; технологий мониторинга стока наносов. Приводятся данные об интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах водосборов умеренного пояса и оценка доставки наносов водосборов разного размера в речную сеть. Рассмотрены методика исследования речных пойм, их формирования, эволюции, принципы картографирования; практические вопросы освоения пойм и отражения хозяйственной деятельности на них. На примере крупнейших бассейнов рек РФ (Оби, Енисея, Лены и Колымы) показано, что в современных гидроклиматических условиях эти территории являются областями аккумуляции, где сток наносов, выносимый за пределы речного бассейна, значительно ниже массы наносов, перемещаемых эрозионными процессами на водосборе и в руслах рек.

Ключевые слова: эрозионно-аккумулятивные системы, смыв почвы, модели эрозии, пойменно-русловые комплексы, гидродинамическое моделирование, сток наносов, геохимия речных наносов

DOI: [10.71367/3034-4638-2026-1-1-8-44](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2026-1-1-8-44)

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионно-русловые системы (ЭРС) — пространственные системы взаимодействия водных потоков и подстилающей поверхности, границы которых соответствуют речным водосборам. Основными механизмами функционирования эрозионно-русловых систем являются эрозионные и русловые процессы. Связующим процессом между ними является перемещение вещества — сток воды и наносов. Происходит замыкание цикла — эрозии, транспорта и аккумуляции наносов.

Существует ряд подходов в изучении перемещения наносов в речных бассейнах (табл. 1). ЭРС представляют собой древо водотоков с примыкающими к ним участками водосбора (склонами), состоящими из

серии подсистем, динамически связанных потоками массы и энергии (Clayton, Chorley, Kennedy, 1972). Представление о существовании обособленных участков перемещения материала стало одним из ключевых подходов в теории стока наносов (Burt, Allison, 2009). Теория единого эрозионно-аккумулятивного процесса, развиваемая учением Н.И. Маккавеева (1955), основана на выявлении общего и частного в эрозионно-аккумулятивном процессе в разных звеньях сети водотоков. Каскадная структура речного бассейна связана с продольной трансформацией соотношения русловых и бассейновых источников (Алексеевский, 1998; Голосов, 2006). Теория руслового «конвейера» (jerky conveyor belt) Д. Фергюсона (Ferguson, 1981) важнейшим свойством транспорта вещества и энергии по длине

Таблица 1. Подходы к изучению перемещения наносов в речных бассейнах**Table 1.** Approaches to studying sediment transport in river basins

Концепция	Авторы	Основные свойства	Выделяемые уровни
Единый эрозионно-аккумулятивный процесс	Маккавеев, 1955; Литвин, 2002	Единство поступления, транспорта и аккумуляции наносов	Эрозионно-склоновые подсистемы; Овражно-балочные подсистемы; Речные подсистемы
«Речной конвейер» (jerky conveyor belt)	Ferguson, 1981	Эпизодичность транспорта наносов в связи с их временной задержкой на разных уровнях ЭРС	—
Прерывистость каскада наносов (sediment disconnectivity)	Fryirs, 2013	Перенос вещества определяется существованием разных зон аккумуляции (буферы, барьеры и аккумулятивные поверхности), которые определяют время доставки наносов	Части водосбора: верхние звенья речной сети; средние водосборы; нижние звенья речной сети. Продольные связи (приток-река; верхнее-нижнее течение) Поперечные связи (склон-русло; пойма-русло) Вертикальные связи (массообмен в системе поток-дно)
Связанность каскада наносов (sediment-connectivity)	Bracken et al., 2015	Перемещение наносов определяется в зависимости от соотношений «фаза-частота» эрозии, транспорта и аккумуляции; пространственно-временными соотношениями между эрозией и транспортом наносов	В пределах водосборов Между водосбором и руслом Внутри русловой сети
Непрерывность транспорта наносов (sediment continuity)	Joyce et al., 2018	Сохранение баланса массы при нисходящем движении частиц в ЭРС	

русловых систем называет эпизодичность в связи с временной задержкой потоков на разных уровнях эрозионно-русловых систем при сохранении единства процесса. Понятие непрерывности транспорта наносов (sediment continuity (Joyce et al., 2018)) характеризует закон сохранения массы при перемещении вещества из верхних в нижние звенья ЭРС. Выделение продольных, поперечных и вертикальных связей между частями эрозионно-русловой системы, выполненное К. Fryirs (2013), выявляет разные типы взаимодействия между источниками поступления и потоком наносов (соответственно склон-приток-река; горизонтальные деформации; вертикальные деформации). Сочетание эрозионных, транзитных и аккумулятивных участков определяет существование промежуточных звеньев в общей системе переноса вещества (Fryirs, 2013; Fryirs et al., 2007) и таким образом — «прерывистость» потока наносов. В общем случае, вниз по течению снижается

проявление продольных и поперечных связей и увеличивается выраженность вертикальных связей. Некоторые исследователи подчеркивали еще большую специфику пространственно-временных изменений характеристик стока наносов (Bracken et al., 2015) и, в частности, ключевую роль коротких гидрологических событий в перераспределении наносов в пределах ЭРС (Brierley, Fryirs, Jain, 2006).

Все это позволяет выделить в пределах эрозионно-русловых систем три основных пространственных компоненты — водосбор, река, устье. Они связаны между собой единым процессом — перемещением наносов. Эти пространственные единицы и процессы, происходящие в их пределах, являются основными составляющими учения о едином эрозионно-аккумулятивном процессе, рассматриваемом в данной статье: водосбор (склоны и междуречья), русла рек и сток наносов. С учетом того, что в последние годы публиковался ряд обобщающих

трудов по эрозионно-русловым системам, в первую очередь, одноименная монография 2017 г., в данной статье рассматриваются только наиболее значимые вопросы в каждом из направлений изучения ЭРС и делается акцент на современные технологии исследований. Представленные в статье результаты обобщают исследования НИИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева.

1. СКЛОНЫ И МЕЖДУРЕЧЬЯ

Современные технологии исследований

Исследования склонов и междуречий охватывают широкий спектр процессов, связанных как с эрозией почв и развитием линейных форм временных водотоков, так и с аккумуляцией наносов. Таким образом, рассматривается разнообразие эрозионно-аккумулятивных процессов. В пределах речных бассейнов поверхностный сток на склонах и в днищах временных водотоков приводит к переносу рыхлообломочного материала и формированию как отрицательных (промоины, овраги и т. д.), так и положительных (шлейфы, конусы выноса и т. д.) форм рельефа. Степень детальности оценок объемов выноса и аккумуляции транспортируемых наносов определяет точность количественных оценок вещества, поступающего с площади исследуемого водосбора в постоянные водотоки и водоемы. Особенностью склонового стока воды является его дискретность во времени и пространстве и существенный вклад экстремальных эрозионных событий в суммарный вынос материала за среднесуточный период (Edwards, Owens, 1991; Larson et al., 1997). Эти характеристики предопределяют необходимость широкого использования косвенных методов оценки скоростей смыва, размыва и переотложения материала, поскольку организация и поддержание сети мониторинга стока воды и наносов в различных звеньях флювиальной сети на участке от элементарного склона до русла постоянного водотока является весьма затратной задачей (Голосов, 2008). Ограниченные ряды подобных наблюдений, когда синхронно фиксируется сток воды и наносов в круглогодичном режиме на склоновых водосборах и в суходольной сети, единичны, а их продолжительность не превышает двух десятилетий (Cerdan et al., 2012). Несколько чаще длительные ряды встречаются на постах наблюдений за стоком воды с автоматизированным отбором проб воды на мутность, расположенных на малых водотоках (Benselama et al., 2019). Но в этом случае накапливаются только данные о выносе материала в постоянные водотоки, и отсутствует информация об объемах материала, перемещенного внутри данного водосбора. В горах

они обычно оцениваются на основе сочетанного применения дистанционных методов исследования и оценок площадей распространения и скоростей протекания различных экзогенных процессов, которые определяются с помощью наземного лазерного сканирования, путем установки ловушек наносов и применения современных методов датирования отложений (Кедич и др., 2020).

Для сельскохозяйственных водосборов, на которых проводится регулярная обработка почвы, использование дистанционных методов ограничивается только возможностями оценки линейного и объемного прироста овражных форм (Медведева и др., 2018; Frankl et al., 2013). Но и в этом случае необходимо использовать наземные повторные съемки в сочетании со съемками с БПЛА, так как только это дает возможность с нужной точностью оценивать трансформацию стенок овражных форм (Castillo et al., 2012). Технологии использования БПЛА при оценке трансформации рельефа эффективны только при высокоточной привязке реперных точек, число которых должно быть достаточным для сопоставления цифровых моделей рельефа, построенных по результатам разновременных съемок (Харченко, 2023). Процессы плоскостного и ручейкового смыва вносят в большинстве случаев значимый вклад в перенос материала на пахотных склонах. Тем не менее современные технологии пока не позволяют фиксировать изменения рельефа, связанные со смывом, с достаточно высокой точностью даже на пастбищных склонах (Харченко, 2024). Это связано с тем, что даже различия во влажности почвы сопоставимы с изменениями рельефа, обусловленными потерями почвы за счет проявления эрозионно-аккумулятивных процессов. Исключением являются только участки интенсивного смыва, когда за одно эрозионное событие с поверхности склона смывается несколько сантиметров, а иногда и весь пахотный слой.

Тем не менее следует учитывать, что значимый вклад в среднесуточные потери почвы со склонов вносят экстремальные эрозионные события редкой повторяемости, а также то обстоятельство, что существенная часть наносов, вовлеченных в плоскостной и ручейковый смыв, переоткладывается внутри пашни (Голосов и др., 2024). Кроме того, механическая эрозия, связанная с обработкой почвы, также вносит свой, местами весьма значительный (Lindstrom et al., 1992), вклад в перераспределение почвенного материала на пашне. Поэтому наиболее перспективными представляются методы повторного отбора проб с определением в них содержания цезия-137 или других радионуклидов, которые используются в качестве трассеров.

Данный подход стал использоваться еще с конца прошлого века (Zhang, 2023), но в последние годы в него были внесены важные дополнения, связанные с принципами отбора проб почвы в пределах различных элементов рельефа склона или склонового водосбора (Иванов и др., 2024). Выделение различных элементов в пределах обрабатываемых склонов предполагает, с одной стороны, понимание процессов формирования поверхностного стока и расположения возможных участков переотложения наносов внутри пашни, а с другой стороны, должно базироваться на степени детальности конечных оценок скоростей перераспределения почвенного материала (Panin et al., 2001). В частности, в случае высокой расчлененности склонов ложбинно-потяжинной сетью необходимо учитывать вклад механической эрозии в заполнение почвенным материалом крупных промоин, формирующихся в днищах ложбин и потяжин (Belyaev et al., 2005).

Массовое использование эрозионных моделей для расчета смыва почвы с пахотных склонов предполагает обязательную верификацию полученных данных расчетов на основе использования независимых полевых методов оценки смыва и аккумуляции. Это связано с тем, что большая часть моделей либо полностью эмпирические, либо в них присутствуют блоки, основанные на эмпирических данных (Zhidkin et al., 2023). Их применение без верификации оправданно только в регионах, где были собраны данные наблюдений, на основе которых используемые модели были разработаны. Применение в эмпирических моделях глобальных баз данных, доступных для большей части факторов, входящих, например, в наиболее часто используемые модификации USLE, часто ведет к получению непроверенных результатов. Это во многих случаях обусловлено дефицитом метеорологических данных (разреженная сеть метеостанций) или лабораторных анализов (механический состав почв) для целого ряда регионов, с одной стороны, и высокой пространственно-временной вариабельностью информации о ряде факторов (осадки, посевы и т. п.) с другой. Совершенствование обработки дистанционных данных и собственно повышение качества космических снимков постепенно улучшают ситуацию с точностью расчетов, но пока она недостаточно высока. Для среднесрочных оценок смыва почвы в последние годы стали использоваться усовершенствованные эрозионные модели, которые позволяют оценивать переотложение наносов на пахотных склонах (Ivanova et al., 2025), а также включают блок оценки вклада механической эрозии в перераспределение почвенного материала внутри пашни (Van Rompay et al., 2001).

Существенным ограничением широкого применения физически обоснованных моделей эрозии для оценки темпов смыва является дефицит данных о водопроницаемости почвы при различных типах ее обработки и уборке урожая (Gupta et al., 2024). Это ключевая характеристика, определяющая коэффициент поверхностного стока со склонов. Следует подчеркнуть, что даже для ненарушенных почв существует высокая пространственная вариабельность водопроницаемости. Это обусловлено неравномерностью сложения почв в связи с влиянием корней травянистых растений, деятельностью землероев, а также с различиями в механическом составе почвы, которые чаще проявляются в пределах территорий с большой пестротой почвообразующих пород.

Надежным индикатором изменений в темпах эрозии на пахотных водосборах являются оценки изменений темпов аккумуляции в ловушках наносов, примыкающих к обрабатываемым участкам. В качестве хрономаркеров помимо набора радионуклидов природного (^{210}Pb) и техногенного (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{240}Pu) происхождения, возможности использования которых в последние годы существенно расширились (Leslie, Hancock, 2008; Golosov, Walling, 2015), используются также продукты сгорания угля (Шамшурина и др., 2024). Это позволяет с большей детальностью реконструировать изменение темпов аккумуляции во времени и делать выводы о росте или снижении скоростей смыва.

Наиболее надежным методом количественной оценки перераспределения наносов на речных водосборах за счет развития эрозионно-аккумулятивных процессов является балансовый подход, который по его содержанию следует отнести к традиционным методам исследований. Однако в последние десятилетия развитие полевых, дистанционных методов, а также совершенствование подходов к исследованию пространственных закономерностей протекания процессов переноса вещества и трансформации форм флювиального рельефа с использованием ГИС-технологий и применением методов машинного обучения, существенно повысили достоверность оценки расходных и приходных частей баланса наносов (Tsyplenkov et al., 2026). При этом остается пока не решенной проблема соотнесения скоростей процессов в разных звеньях флювиальной сети, выявленных за различные интервалы времени. Актуальность этой проблемы обусловлена нестационарностью эрозионно-аккумулятивного процесса, связанной с климатическими флуктуациями, и различиями в воздействии человека на различные элементы

исследуемого водосбора, связанными как с изменениями землепользования, так и с характером обработки почвы, а также воздействием на пути доставки наносов с площади водосбора в постоянные водотоки.

Всё более совершенными становятся технологии идентификации долевого вклада различных источников наносов на водосборах в сток наносов водотоков и заилиние водоемов (Голосов и др., 2020). Существующие методики расчета позволяют выявить питающие провинции в пределах исследуемого водосбора в том случае, если существуют значимые отличия в содержании различных трассеров у выделенных потенциальных источников наносов (Успенский и др., 2025). В последние годы существенно выросло теоретическое осмысление этих процессов (Гирло и др., 2025), расширен и апробирован арсенал разных статистических алгоритмов.

Оценка перераспределения наносов на малых водосборах

Одним из важнейших направлений исследований на междуречных пространствах является оценка перераспределения наносов. Классическое понимание единства эрозионно-аккумулятивного процесса предопределяет необходимость количественной характеристики скоростей и объемов вовлеченного в перенос склоновым стоком рыхло-обломочного материала и интенсивности перераспределения наносов по пути их транспортировки в днища долин постоянных водотоков. Решение этой задачи путем прямых наблюдений за стоком воды и наносов в пределах различных элементов каскадной системы перемещения вещества по

направлению от приводораздельных склонов к днищам сухих долин и далее к постоянным водотокам — достаточно затратный процесс. Это связано с необходимостью организации мониторинга стока воды и наносов, предусматривающего сооружение лотков, собирающих сток на нижней границе пашни, на которых проводятся измерения расхода воды и отбор проб воды на мутность в ручном или автоматизированном режиме. Такие наблюдения за формированием талого стока и смыва проводились НИИ Лабораторией эрозии почв и русловых процессов на Сатинском учебном полигоне. Были установлены среднемноголетние и максимальные величины смыва со склонов и склоновых водосборов различной конфигурации в области распространения вторично-ледникового рельефа, которые изменялись в диапазоне от первых десятков кг/га до 8 т/га за одно снеготаяние (Литвин и др., 1998).

Достоверные данные о среднемноголетних темпах смыва почв и переотложения наносов в пределах склонов и склоновых водосборов в период ливневого и талого смыва получены при совместном применении набора косвенных методов исследования и расчетов по эрозионным моделям. В последние годы подобные исследования были проведены в пределах малых пахотных водосборов, расположенных в различных частях южного мегасклона Восточно-Европейской равнины (Безухов и др., 2019; Голосов и др., 2022, 2024). В качестве примера здесь приводятся оценки эрозии и аккумуляции на малом водосборе Спокоевка, в одном из притоков первого порядка бассейна р. Воробжи, Курская область (рис. 1, табл. 2) (Голосов и др., 2022).

Полученные результаты показывают достаточно высокое соответствие результатов вычисления мас-

Таблица 2. Аккумуляция наносов в днище балки (тонн с участка в год), рассчитанная по радиоцезиевому и почвенно-морфологическому методам (Голосов и др., 2022)

Table 2. Sediment accumulation in the bottom of the ravine (tons per site per year), calculated using radiocesium and soil-morphological methods (Goloso et al., 2022)

Сегмент	Площадь, кв. м	Радиоцезиевый метод		Почвенно-морфологический метод	
		мощность намывной толщи, см	аккумуляция в сегменте, т/год	мощность намывной толщи, см	аккумуляция в сегменте, т/год
A	6628	20	49	220	76
B	4547	18	31	225	53
C	4232	30	49	213	47
D	2618	39	39	200	27
E	2017	33	25	190	20
Всего в днище			194		223

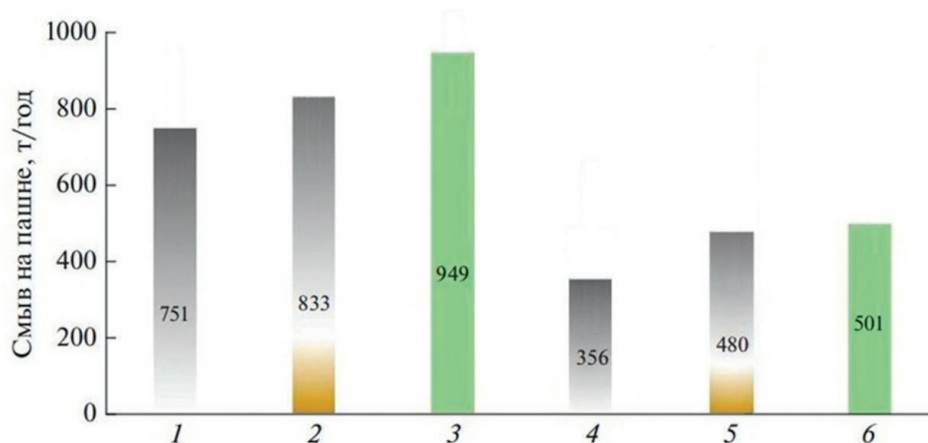


Рис. 1. Средние значения и диапазон варьирования темпов среднемноголетнего смыва почв на пашне водосбора Спокоевка. 1 – суммарный смыв по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1); 2 – вынос наносов с пашни по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1); 3 – суммарный смыв по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1В); 4 – вынос наносов с пашни по почвенно-морфологическому методу (горизонт А1В); 5 – суммарный смыв, установленный на основе расчетов по модели WaTEM/SEDEM; 6 – вынос наносов с пашни, установленный на основе расчетов по модели WaTEM/SEDEM (Голосов и др., 2022)

Fig. 1. Average values and variation range of the rates of average annual soil loss in the arable land of the Spokoevka catchment. 1 – total loss by the soil-morphological method (horizon A1), 2 – sediment removal from arable land by the soil-morphological method (horizon A1), 3 – total loss by the soil-morphological method (horizon A1B), 4 – sediment removal from arable land by the soil-morphological method (horizon A1B), 5 – total loss established on the basis of calculations by the WaTEM/SEDEM model, 6 – sediment removal from arable land established on the basis of calculations by the WaTEM/SEDEM model (Goloso et al., 2022)

сы перемещенного внутри пашни и вынесенного за пределы пашни почвенного материала, полученных на основе расчетов по модели WaTEM/SEDEM и выявленных при использовании почвенно-морфологического метода (рис. 1). Следует отметить, что расположение зон аккумуляции внутри пашни, выявленное по результатам расчетов по модели, далеко не всегда совпадает с фактическим расположением зон аккумуляции. В связи с этим модель SERSAL, разработанная на основе совершенствования универсального уравнения почвенной эрозии в НИЛабораии эрозии почв и русловых процессов, более достоверно привязывает положение зон аккумуляции, определенное на основе расчетов, к их фактическому расположению на участке (Ivanova et al., 2025). Также небольшие различия между результатами применения двух полевых методов выявлены в оценке среднегодовой массы отложения наносов в днище балки Спокоевки, где переотлагается большая часть смытого с пашни материала (табл. 2). Вполне достоверно выглядит и соотношение смытого с пашни и переотложившегося в днище материала, при том что определенная часть смытых наносов аккумулируется на участке между нижним краем пашни и днищем балки, а другая – выносится за пределы водосбора.

Оценка доставки наносов с площади малых водосборов в постоянные водотоки и водоемы

Изучение связи процессов на водосборе и в руслах рек проводится на основе оценки доставки наносов. При этом несмотря на то, что коэффициент доставки наносов, равный отношению стока наносов к объему смытого грунта на водосборе, стал важнейшим инструментом в изучении ЭРС, погрешность масштабирования его оценок и несоответствие измеряемого стока наносов и расчетных значений эрозии делает исследование доставки наносов крайне актуальным.

Специфика развития эрозионно-аккумулятивных процессов в горах и на равнинных территориях вносит существенные различия в особенности транспорта и переотложения наносов по пути их доставки в постоянные водотоки. В горах источником материала, поступающего в водотоки и водоемы, являются продукты выветривания коренных пород, формирующие рыхлообломочный чехол, мощность которого варьирует в широких пределах в зависимости от соотношения скоростей выветривания и денудации. Набор экзогенных процессов, которые наряду с водной эрозией способны перемещать материал внутри склонов и доставлять его в водотоки, достаточно обширен, а их вклад в суммарную дену-

дацию изменяется в зависимости от высотной зоны. Это предопределяет необходимость проведения геоморфологического картографирования исследуемых малых горных водосборов с выделением площадей распространения различных склоновых процессов исходя из принципа доминирования одного из них на конкретном участке. При этом всё равно, согласно имеющимся количественным оценкам перераспределения наносов на склонах, водно-эрозионные процессы вносят значимый вклад в вынос материала с площади водосборов как в среднегорном (Харченко и др., 2023), так и в высокогорном поясах (Tsyplenkov et al., 2021). А сокращение площади пахотных земель в пределах крупных речных бассейнов, таких как р. Кубань (выше Краснодарского водохранилища), является ключевым фактором снижения стока наносов (Tsyplenkov et al., 2025). В среднегорном поясе Северного Кавказа склоны преимущественно используются в качестве пастбищ, и в зависимости от нагрузки проективное покрытие склонов травянистой растительностью изменяется в широких пределах. Оценка баланса наносов с использованием комплекса полевых, дистанционных и расчетных

методов на малом водосборе Гитче-Гижгит (бассейн р. Баксан) позволила установить, что продукты плоскостного и ручейкового смыва составляют 83% от общего объема материала, выносимого в водоем, расположенный в устьевой части водосбора. При этом данные процессы распространены только на 50% площади водосбора. На долю остальных экзогенных процессов, включая линейную эрозию, приходится оставшиеся 17% (табл. 3) (Tsyplenkov et al., 2026).

На равнинах умеренного пояса при отсутствии антропогенных нарушений сток наносов, поступающих с площади водосбора, ничтожно мал. Это определяет значительное превышение объемов перемещаемого материала на водосборах крупных рек над результирующим стоком наносов в их устьях (Chalov, Ivanov, 2024). Это обусловлено высоким проективным покрытием поверхности почвы растительностью, хорошей водопроницаемостью почв и защитной ролью крон деревьев и кустарников. Мониторинговые наблюдения, проводившиеся в Центрально-Черноземном заповеднике на участке некосимой степи, выявили полное отсутствие

Таблица 3. Сводные данные по оценке объемных потерь и выноса наносов с водосбора Гитче-Гижгит с использованием средних показателей скоростей каждого из учтенных процессов (по Tsyplenkov et al., 2026 с упрощением)

Table 3. Summary data on the assessment of volumetric losses and sediment removal from the Gitche-Gizhgite catchment using the average rates of each of the processes taken into account (according to Tsyplenkov et al., 2026 with simplification)

Экзогенный процесс	Площадь распространения, км ² (%)	Среднегодовой объем перемещенного материала, м ³ год ⁻¹ (%)	Средний <i>SDR</i> *	Расчетный объем материала, поступившего в водоем, м ³ год ⁻¹ (%)
Осыпи	0.053 (2.85)	62 (5.62)	0.19	11 (5.73)
Почвенный крип и сезонная солифлюкция	0.79 (42.5)	13.5 (1.22)	0.17	7 (3.65)
Линейная эрозия	0.008 (0.43)	86.5 (7.84)	0.24	14 (7.29)
Плоскостной смыв и ручейковая эрозия	0.94 (50.5)	942 (85.3)	0.17	160 (83.3)
Скальные выходы	0.07 (3.76)	—	—	—
Всего	1.86 (100)	1104 (100)	0.17	192 (100)

* Коэффициент доставки наносов.

формирования поверхностного стока (Грин, 1970). Антропогенное вмешательство и, прежде всего, распашка земель приводят к резкому росту поверхностного стока и смыва почвы. Наглядной иллюстрацией влияния площади распашки водосбора на доставку наносов в водоем являются результаты детальных исследований перераспределения наносов на пруду Поповском (Голосов и др., 2020). Согласно оценкам, за весь период существования пруда с 1964 г. в нем отложилось не менее 75–80 см наносов. При этом 97% из них были доставлены со склонов в водоем до 1986 г., что соответствует среднегодовому выносу 1.7 мм с площади водосбора. После 1986 г. вынос материала с водосбора в пруд резко сократился и составил в период до 2010 г. величину, соответствующую слою выноса не более 0.03 мм/год. Столь кардинальные изменения были обусловлены двумя основными причинами: уменьшением площади пашни с 134 до 50 га и резким сокращением вплоть до полного прекращения талого стока, связанным с сокращением глубины промерзания почв на фоне общего повышения температур воздуха в зимние месяцы (Барабанов и др., 2018). Эпизодические проявления ливневого стока и смыва, а также размыва вершин овражных врезов приводили к поступлению в пруд ничтожно малого объема наносов, так как их основная масса переоткладывалась по краю пашни, в днищах сухих долин и конусах выноса. Данный пример наглядно демонстрирует влияние изменений площади пашни и климата на доставку наносов с антропогенно нарушенных склонов и склоновых водосборов в постоянные водотоки и водоемы южного мегасклона Восточно-Европейской равнины.

II. РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Гидродинамическое моделирование русловых деформаций

Важнейшим направлением в области изучения русловых процессов стало развитие методов математического моделирования (используется также термин «гидродинамическое моделирование» как раздел математического, который, соответственно, использует уравнения гидродинамики). Оно позволяет не только анализировать гидравлический режим водного потока при различных гидрологических сценариях, но и прогнозировать русловые переформирования в русле и на пойме, как в краткосрочной, так и в долгосрочной (20–50 и более лет) перспективе, в т. ч. с учетом глобальных тенденций изменения климата и водного стока рек. Моделирование — обязательный элемент проектирования крупных инженерных сооружений в реч-

ных руслах и на пойме; оно позволяет просчитать разные сценарии трансформации гидрологических и морфодинамических характеристик при техногенном вмешательстве в природные процессы (рис. 2). При этом гидродинамическое моделирование аккумулирует широкий спектр гидрологических, геоморфологических, геофизических, геодезических, ландшафтных исследований и является завершающим звеном в цепочке анализа и прогнозирования пойменных и русловых процессов.

Важнейшее значение в исследовании русловых процессов получил программный комплекс STREAM 2D CUDA, разработанный в ООО НПП «Аквариус Аналитик». В последней версии этой программы используется точный решатель задачи Римана для уравнений мелкой воды над разрывным дном (Алексюк и др., 2020), разработанный в ИВП РАН и опубликованный в (Aleksyuk, Belikov, 2019; Aleksyuk, Malakhov, Belikov, 2021). Наиболее подробно программно-моделирующий комплекс STREAM 2D CUDA и приложения к нему описаны в монографии (Беликов, Алексюк, 2020). Программа предназначена для расчета нестационарных и неравномерных течений, к которым относятся половодья и паводки в реках, речных долинах и водохранилищах, волны прорыва, вызванные разрушением напорного фронта плотин, и т. п. Для расчета деформаций дна и берегов русла, заиления и промывки водохранилищ применяется новый алгоритм транспорта наносов с учетом неоднородного (многофракционного) состава грунта, движения как влекомых, так и взвешенных наносов, переформирования подводных и надводных склонов (Krylenko I. et al., 2018; Алабян и др., 2018; Беликов и др., 2025). В модели реализован блок моделирования ледовых явлений, позволяющий учитывать основные параметры, связанные с льдообразованием; находится на стадии внедрения модуль учета неоднородности слоев грунта в разрезах русловых и пойменных отложений.

Все большее применение в практике математического моделирования находят данные дистанционного зондирования Земли. Космические снимки используются практически на всех этапах создания математических моделей, а также при визуализации результатов моделирования. При составлении цифровой модели рельефа космические снимки используются для актуализации положения береговой линии, антропогенных объектов и т. п. Многоканальные космические снимки могут быть применены к составлению ландшафтных карт, которые служат для выделения зон различной шероховатости. Космические снимки, отражающие выдающееся гидроло-

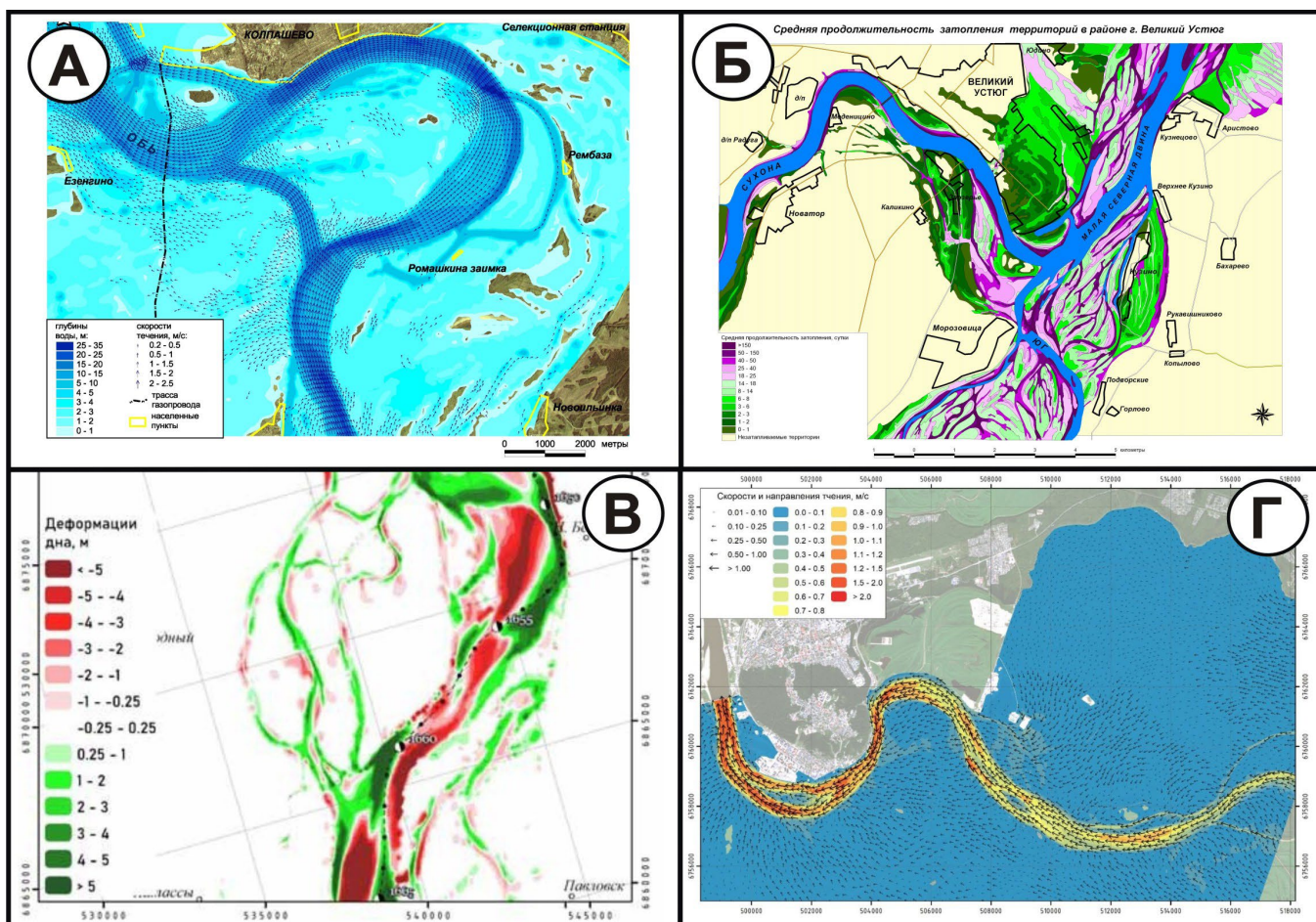


Рис. 2. Визуализация результатов моделирования русловых и пойменных процессов: А – рассчитанные глубины и скорости течения р. Оби при проектировании спрямляющего канала через излучину Оби у г. Колпашево (половодье обеспеченностью 1%); Б – расчет средней продолжительности затопления пойм Северной Двины, Юга и Сухоны у г. Великий Устюг; В – прогноз деформаций дна р. Лены на 20-летний период для средней части Якутского узла (фрагмент); Г – рассчитанные скорости течения Иртыша при расходе воды 1% обеспеченности и перекрытии дамбами предназначенного к застройке пойменного сегмента

Fig. 2. Visualization of the results of modeling channel and floodplain processes: А – calculated depths and flow rates of the Ob River during the design of a straightening canal through the Ob bend near the town of Kolpashevo (flood probability of 1%); Б – calculated average duration of flooding of the floodplains of the Northern Dvina, Yug and Sukhona near the town of Veliky Ustyug; В – forecast of deformations of the Lena River bed for a 20-year period for the middle part of the Yakut node (fragment); Г – calculated flow rates of the Irtysh with a water flow of 1% of the probability and damming of the floodplain segment intended for development

гическое событие, как, например, затопление поймы редкой обеспеченности, могут служить материалом для калибровки путем сопоставления фактических и расчетных (модельных) границ затопления. По космическим снимкам также возможно определение положения ледовых заторов для их корректного учета при специализированных сценарных расчетах.

Одним из примеров изучения эрозионно-русловых систем для разработки методов инженерного регулирования (управления) русловых процессов

с применением методов гидродинамического моделирования является участок среднего течения р. Лены (от г. Покровска до узла слияния с р. Алдан) (Корнилова, Крыленко и др., 2018; Чалов и др., 2019; Krylenko I. et al., 2024). Общим фоном, определяющим морфологию и динамику этого участка, являются большая водоносность реки, слабая устойчивость берегов к размыву (сложенных преимущественно рыхлыми грунтами), внутригодовая неравномерность стока, наличие многолетнемерзлых пород в русле и пойме, еже-

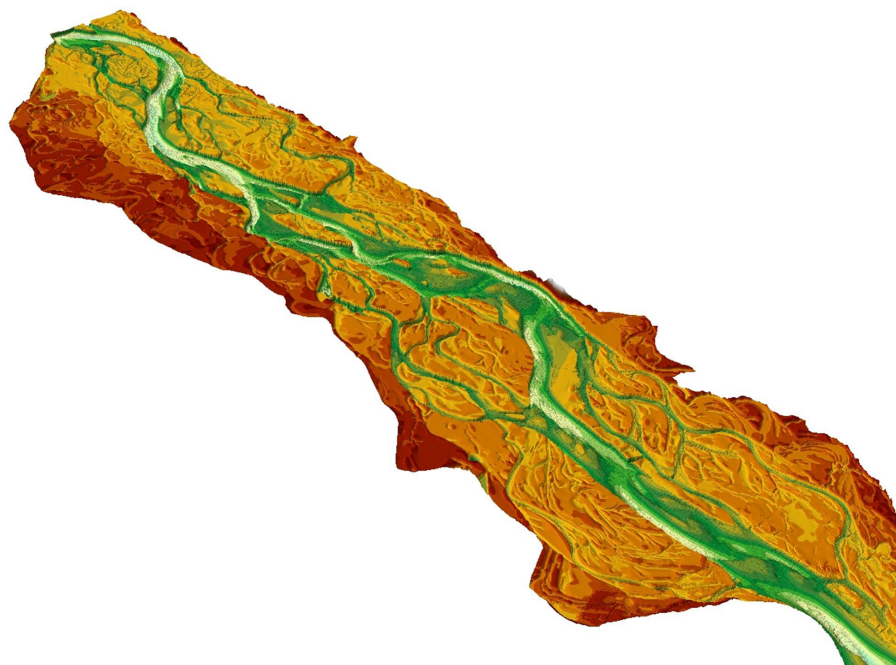


Рис. 3. Пример визуализации цифровой модели рельефа пойменно-руслового комплекса р. Лены в трехмерном виде на центральную часть модельного участка р. Лены (Якутский узел)

Fig. 3. An example of visualization of a digital relief model of the floodplain-channel complex of the Lena River in a three-dimensional view of the central part of the model section of the Lena River (Yakut node)

годно формирующиеся ледовые заторы. Большая ширина реки способствует делению потока на отдельные струи и их миграции в пределах русла при изменении уровня воды, что приводит к ежегодному, зачастую продолжительному затоплению поймы. Накопленные многолетние данные натурных исследований позволили подготовить единую двумерную численную модель пойменно-руслового комплекса р. Лены общей протяженностью около 300 км. Расчетная сетка и рельеф модели (рис. 3) учитывают как разветвления основного русла, так и всю пойму р. Лены, местами превышающую более 10 км в ширину, основные русловые и пойменные протоки. Гибридная треугольно-четырёхугольная сетка двумерной гидродинамической модели включает более 300 тыс. расчетных ячеек.

Хозяйственная нагрузка на приречные территории модельного участка одной из крупнейших рек РФ весьма велика и постоянно усиливается. Начато строительство уникального мостового перехода через Лену в районе Табагинского мыса, проектируются масштабные работы по инженерной защите левобережных пойменных массивов от затопления, осуществляется разработка русловых и пойменных карьеров, ежегодно проводятся дноуглубительные и русловыправительные работы для обеспечения безаварийного судоходства, устойчивого функционирования водозаборных узлов г. Якутска, подходных каналов к речному порту и Жатайскому судостроительному заводу. На этом участке был разработан комплекс расчетных модулей, позволяющих прогнозировать изменения гидрологических и русловых

процессов при совокупном влиянии антропогенных факторов и изменений климата на основе методов математического моделирования. Расчетные модули позволяют решать следующие задачи:

- оценка зон затопления и гидравлических характеристик потока при наводнениях и паводках;
- оценка гидравлики потока при ледовых заторах;
- оценка русловых деформаций в бытовых условиях и при антропогенном вмешательстве;
- оценка климатически обусловленных изменений гидравлики потока и русловых процессов;
- научное сопровождение проектирования гидротехнических мероприятий:
 - проектирование противопаводковых дамб и берегозащитных сооружений;
 - проектирование мостовых переходов и подводных линейных переходов.

Отдельным направлением исследования стало внедрение методов математического моделирования русловых процессов для обоснования дноуглубительных мероприятий, нацеленных на улучшение судоходных условий на затруднительных участках (Завадский, Фингерт и др., 2019; Чалов и др., 2020). Учитывались современные гидрологические и морфологические характеристики пойм и русла р. Лены, а также полученные на основе модельных расчетов прогнозные оценки русловых переформирований на период 5, 15, 25 лет. Это позволило в рамках наиболее вероятных гидрологических сценариев визуализировать из-

менения руслового рельефа на кратко-, средне-, долгосрочную перспективу и дать количественную оценку необходимых объемов дноуглубительных работ для оптимального положения трассы судового хода с учетом возможности увеличения гарантированной глубины судового хода на лимитирующих перекатах до 3.0 м. Для наиболее затруднительных для судоходства участков, в число которых вошли Якутский узел, перекатный участок Делюсюнях, Намский-Машарский перекаты, Хайтыалахско-Атаринский участок, перекаты Омулаган-Мунхасыт, были созданы локальные математические модели. Это позволило для каждого участка провести сценарные расчеты на 5, 15 и 25 лет, на основе которых были уточнены прогнозы русловых переформирований ретроспективного гидролого-морфологического анализа. С учетом выявленных тенденций развития русла в численные модели закладывались различные варианты дноуглубительного регулирования русла с целью закрепления динамической оси потока в том или ином положении без ущерба для судоходных условий на выше и ниже расположенных участках. Результатом проведенных исследований стала схема коренного улучшения судоходных условий на перспективу до 2050 г., согласованная и принятая к реализации в ФБУ «Администрация Ленского бассейна» (Росморречфлот РФ).

Исследования пойменно-русловых комплексов

Речные поймы представляют собой части нижнего звена эрозионно-русловых систем, периодически затопляемые в половодья и паводки, покрытые растительностью и обремененные своим происхождением эрозионно-аккумулятивной деятельностью речного потока (Чалов, 1970). В России речные поймы занимают площадь 42 млн га (Добровольский, Балабко и др., 2011), или 2.4% территории. В хозяйстве они используются давно и повсеместно; освоена примерно половина площади пойм. Использование речных пойм многоцелевое: селитебное; промышленное; добыча полезных ископаемых; транспортное; энергетическое (строительство тепловых и гидроэлектростанций); сельскохозяйственное; лесохозяйственное; рыболовное, рекреационное. Задачи ведения хозяйства в поймах, прогноза опасных явлений и катастроф, связанных с регулярными половодьями, невозможно решить без знания механизма формирования и развития пойменных ландшафтов.

Изучение пойм на протяжении всей истории носило эмпирический и утилитарно-практический характер, и только с середины XX в. было поставле-

но на научную основу. Основная причина — недостаточное понимание генезиса пойм и механизма их формирования. До начала 50-х гг. XX в. большинство исследователей связывало происхождение пойм и особенности их рельефа с затоплением dna речной долины полыми водами. При этом поверхность поймы рассматривалась как неизменная и существовавшая изначально. Только в 1949 г. Н.И. Маккавеев и в 1951 г. Е.В. Шанцер сформулировали тезис о возникновении речных пойм в результате эрозионно-аккумулятивной деятельности потока и русловых деформаций. Развитие русловедения во второй половине XX в. решило эту проблему. Сейчас русловые и пойменные процессы рассматриваются как единое явление, а процесс формирования пойм, их рельефа и геологического строения, затопления получил полное, вплоть до деталей, физическое объяснение. Установлена связь типов пойм с типами русел, с определенными гидрологическими и русловыми режимами; разработаны геоморфологические классификации пойм (Попов, 1968; Чернов, 1983; Чалов, Чернов, 1985), последние из которых (Чалов, Чернов, 1985; Чернов, 2009) имеют сложную блоковую структуру, показывая строгую зависимость типов и разновидностей пойм, их рельефа, литологии от типа русла, вертикальных и горизонтальных русловых процессов и многочисленных нефлювиальных факторов. В развитие положения о единой системе русло-пойма было сформулировано понятие о пойменно-русловом комплексе (ПРК, Чернов, 2009). Главные его составляющие — русло как динамичная и активная часть, пойма и выходящие к руслу уступы террас и коренных берегов как подвижные границы.

Признание русловых процессов в качестве узлового фактора формирования речных пойм позволило вычислить темпы развития пойменных ландшафтов (ландшафтная структура пойм разветвленных рек оказалась весьма подвижной), построить эволюционно-динамические ряды природных комплексов и развивать ландшафтно-индикационное направление в поймоведении: динамика почвенно-растительного покрова и ландшафтов в целом рассматривается как показатель направленности, интенсивности, многолетнего и сезонного режима русловых деформаций и гидрологического режима реки (Беркович, Злотина, 1983; Злотина, 1989; Сурков, 1999).

Четыре давно известных метода натурного исследования пойм — точечная рекогносцировка, профилирование, сплошное картографирование и метод комплексной ординации (Роднянская, 1961; Анненская, 1963; Жучкова, 1977; Жучкова, Раковская, 2004) — сейчас дополняются квадрокоптерной

(или лидарной) съемкой и математическим моделированием пойменных процессов (в частности, прохождения потока половодья и трансформации рельефа — размыва или намыва берегов, перестройки русла реки и пойменных массивов). Часто они применяются совместно, дополняя друг друга. Широко применяются и косвенные аналитические методы — дешифрирование аэро-, космо- и коптерных снимков, ландшафтно-индикационный, метод построения эволюционных рядов пойменных урочищ и опросы местных жителей.

Точечная рекогносцировка применяется при мелком масштабе работ, большой территории исследования; в случаях, не требующих создания специальных (геоморфологических, ботанических, ландшафтных) карт, — при локальной застройке, сооружении берегоукреплений, противопаводковой защиты, трансформации сети пойменных протоков, создании на них прудов и водохранилищ, русловых изысканиях, трассировании местных дорог и коммуникаций.

Профилирование — основной прием исследования пойм при геоморфологических, почвенных, ботанических, ландшафтных, геофизических, геохимических работах, исследовании режима затопления и специальных работах, связанных с освоением пойм, — трассированием дорог, коммуникаций, строительством мостов. В комплексе с квадрокоптерной съемкой и анализом космических снимков метод также позволяет создавать специальные карты пойм и схемы затопления. Суть метода — в прокладке линейных поперечных профилей через пойму, от одного борта долины до другого, с выходом на бровки коренных берегов и террас. Метод комплексной ординации — по сути, то же профилирование, но дополняемое одновременным снятием данных (снегомерных, уровня воды в пойменных водоемах, температуры и влажности почв, мощности отложившихся наносов, микроклиматических, характеристик растительного покрова, геофизических, геохимических и пр.) в выбранных точках профиля. Фактически это стационарный или полустационарный (при сезонном производстве работ в полосе профиля) метод, направленный на исследование природных режимов, динамики природных комплексов.

Картографирование поймы — наиболее дорогостоящий и сложный метод ее исследования. Он используется при специальных исследованиях для целей сельского хозяйства, мелиорации, оценки радиоактивного загрязнения поймы, при экологических исследованиях, широкомасштабной застройке пойм. При комплексных крупномасштабных исследованиях и картографировании поймы изучается

каждый компонент и свойство пойменного ландшафта, а также факторы, его формирующие.

Картографирование, в частности, применялось при изучении техногенных террас, возникающих на месте пойм в результате их выхода из режима регулярного затопления под влиянием антропогенных факторов. Техногенные террасы характеризуются специфическими ландшафтами, резко отличными от пойменных — вплоть до сплошной городской застройки, имеют искусственный режим стока воды и увлажнения, особый почвенно-растительный покров (Сурков и др., 2019; Завадский и др., 2020; Завадский и др., 2021; Завадский, Сурков, Самохин, 2025). Их водный режим отличен от пойменного. При блокировании регулярного (или периодического) затопления поймы ее водный режим становится плакорным. Речной поток больше не является его составляющей, основными факторами увлажнения становятся осадки, снеготаяние и сток воды с соседних возвышенных территорий. Сток воды на бывшей пойме сосредоточивается в старичных понижениях и ложбинах, а незатопляемые теперь гривы и гряды становятся водоразделами. Связанная транзитным пойменным потоком поверхность распадается на изолированные водосборы, которых на первых порах, из-за обилия ложбин, может быть много.

Квадрокоптерная съемка стала применяться совсем недавно. Ее достоинством служат возможность фотографирования малодоступных сегментов поймы, островов, болот и труднопроходимых лесных массивов, а также перспективы повторной съемки поймы в любую фазу водного режима — при затоплении, ледоходе, обсыхании. Квадрокоптеры могут фиксировать последствия катастрофических явлений: ледовых заторов, заломов, прорывов дамб, наводнений, размывов берегов. Квадрокоптерная съемка позволяет строить рельеф поймы (в условной или абсолютной системе высот), отбирая необходимые снимки с помощью специальных программ. Лидарная съемка направлена на исследование рельефа поймы и применяется главным образом при строительстве. Ее достоинство — получение рельефа без постобработки.

Математическое моделирование гидрологических, пойменных и русловых процессов стало обязательным этапом исследований; оно позволяет не только детально отследить затопление пойм и прохождение потока половодья, но и прогнозировать трансформации пойм как в краткосрочном плане, так и на длительную (20—50 и более лет) перспективу. Моделирование — практически незаменимый прием при оценке последствий строительства различных сооружений на пойме. Моделирование

русловых и гидрологических процессов требует значительной подготовки: сбора данных, подготовки цифровой модели рельефа и расчетной сетки, калибровки (подбора параметров для совпадения с реальными измерениями), верификации (тестирования и проверки). Итоги зависят от собранного материала — чем точнее будут исходные данные, тем корректнее выводы.

Ландшафтно-индикационный метод дает возможность оценить среднюю, минимальную и максимальную продолжительность затопления поймы на различных уровнях (как за многолетний период, так и в конкретный год). Он применяется при недостатке непосредственных наблюдений за затоплением поймы, при редкой сети гидрологических постов или их полном отсутствии, а также при недостаточных данных о рельефе поймы, и основан на расположении растительных сообществ, почв и природных комплексов на поймах, в соответствии с определенными высотными «этажами» или ярусами над меженным урезом. В поймах существует относительно жесткая зависимость между условиями увлажнения и растительным покровом, с одной стороны, и между растительным покровом и составом отложений, с другой. Периодические длительные затопления обуславливают жесткий отбор видов, существующих на том или ином ярусе. На поймах прослеживаются своеобразные высотные ряды сообществ (и, шире, природных комплексов), которые отражают развитие поймы от примитивных зарастающих русловых форм до сложно построенных береговых массивов.

Наличие относительно жесткой зависимости высотного положения природных комплексов от условий затопления создает предпосылки для решения обратной задачи: используя их (или один из их компонентов, например, растительность) как индикатор, можно оценить продолжительность и вероятность затопления того или иного массива поймы (Сурков, 2006). При этом выполняется следующая последовательность действий: строится опорный ландшафтный профиль в районе действующего гидрологического поста; рассматривается высотный ряд природных комплексов; производится оценка затопления каждого природного комплекса по данным гидрологического поста; вычисляется удельная высота каждого природного комплекса; уточняется рельеф поймы с помощью ландшафтной карты. На основе этих данных создаются схемы затопления поймы, исходя из поставленных задач. Ландшафтно-индикационным методом можно оценить затопление поймы, даже не имея данных гидрологических постов. Для этого необходимо проводить подбор пойм-аналогов

со сходной ландшафтной структурой и известным водным режимом.

Ландшафтно-индикационный метод позволяет строить карты пойменного рельефа, существенно сокращая геодезические работы. Для этого необходимо привязывать опорные ландшафтные профили к реперам геодезических сетей и проводить горизонтали по контурам ландшафтных таксонов в соответствии с основными особенностями пойменного рельефа. В частности, таким путем был отстроен рельеф пойм рек Надуй, Се-Яха и Морда-Яха в районе пос. Бованенково на центральном Ямале (рис. 4). Ширина пойм здесь местами превышает 20 км. Метод дает удовлетворительные результаты, учитывая жесткие привязки растительных сообществ и природных комплексов на поймах тундровых рек к их положению над меженным урезом. При использовании ландшафтно-индикационного метода наиболее точные результаты режима затопления получаются для островов, прирусловых пойм, ступенчатых пойм, периодически действующих проток. Наиболее корректные результаты характеристик затопления можно получить при наличии длительного, 40–50-летнего ряда наблюдений на опорных гидрологических постах.

Ландшафтно-индикационный метод позволяет оценивать скорости пойменного потока по характеру грунтов и связанным с ними растительным сообществам. Эту зависимость характеризуют режимы формирования пойменных природных комплексов — проточный, слабопроточный, умеренный, слабозастойный, застойный. На равнинных реках проточный режим характеризуется максимальными скоростями на пойме 0.5–0.8 м/с, в руслах более 1.5 м/с; в отложениях господствуют крупные и гравелистые пески, галечники при незначительном участии супесей и легких суглинков. Поймы слабопроточного режима формируются при скоростях потока 0.3–0.5 м/с, для них характерны средне- и мелкозернистые пески, супеси, легкие опесчаненные суглинки. Для пойм умеренного режима характерны скорости 0.1–0.3 м/с, слабозастойного — менее 0.1 м/с, с накоплением тонкого аллювия. При застойном режиме течение отсутствует, здесь накапливаются торф и глина. Проточный режим господствует в прирусловой зоне; на зрелых массивах здесь доминируют ветляники, сосняки, злаковые тополевики, с характерным подлеском (акация, облепиха, шиповник) и вейниковые луга на примитивных и слоистых дерновых почвах, контрастный гривистый, грядовый и ложбинно-островной рельеф с промоинами, высыпками, эрозионными котлами. В слабопроточных и умеренных режимах на пологогривистых

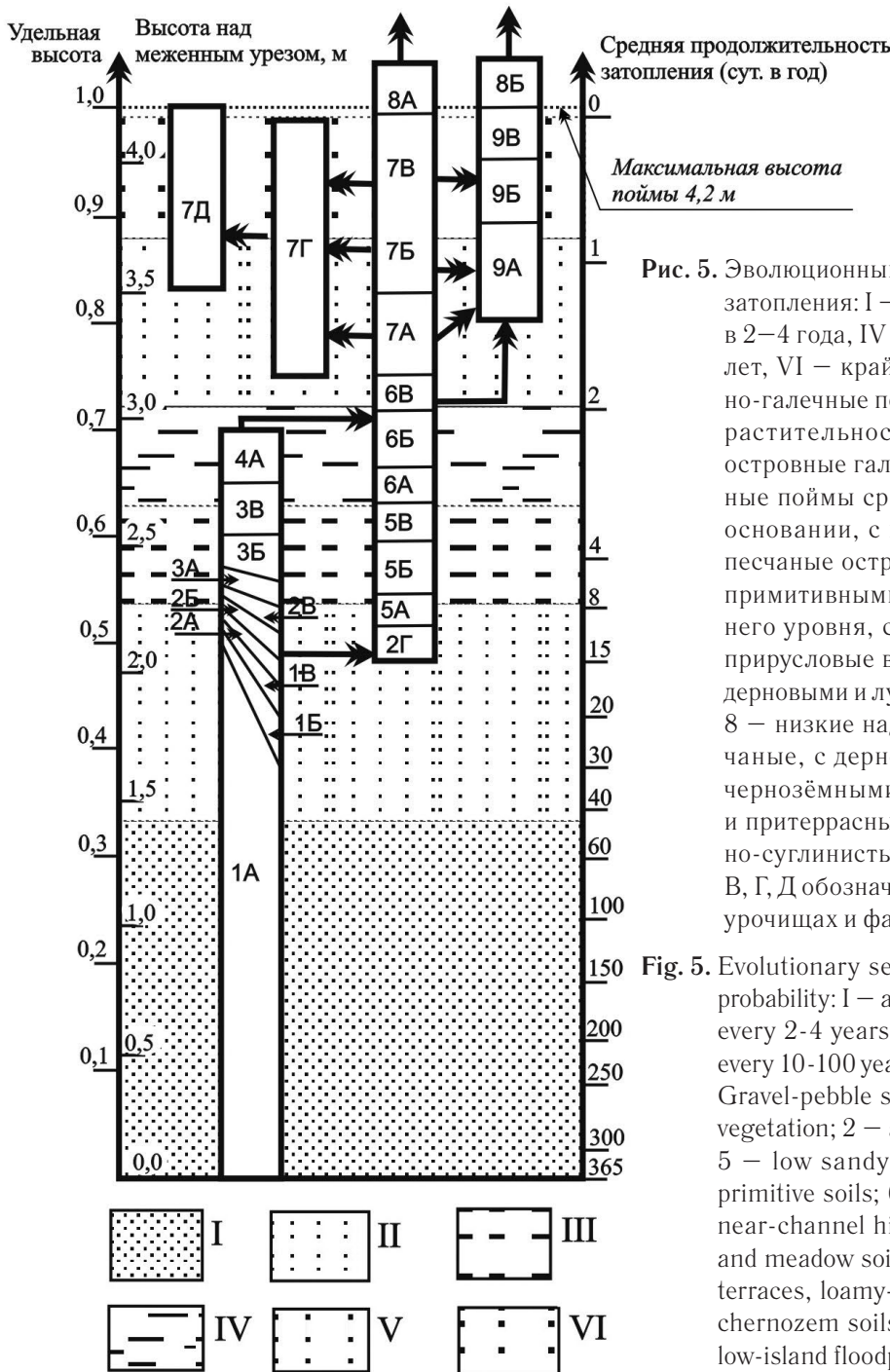


Рис. 5. Эволюционный ряд ПТК нижней Катунь. Вероятность затопления: I – ежегодно, II – 1 раз в 2 года, III – 1 раз в 2–4 года, IV – 1 раз в 4–10 лет, V – 1 раз в 10–100 лет, VI – крайне редкое. Фации и урочища. Гравийно-галечные побочки, косы, осередки: 1 – лишённые растительности; 2 – задернованные; 3 – низкие островные галечные поймы; 4 – прирусловые песчаные поймы среднего уровня, на гравийно-галечном основании, с примитивными почвами; 5 – низкие песчаные островные поймы с дерновыми слоистыми примитивными почвами; 6 – песчаные поймы среднего уровня, с дерновыми слоистыми почвами; 7 – прирусловые высокие ложбинно-островные поймы с дерновыми и луговыми почвами, супесчано-песчаные; 8 – низкие надпойменные террасы, суглинисто-песчаные, с дерново-подзолистыми и оподзоленными чернозёмными почвами; 9 – высокие центральные и притеррасные ложбинно-островные поймы, песчано-суглинистые, с луговыми почвами. Буквами А, Б, В, Г, Д обозначены стадии развития растительности в урочищах и фациях

Fig. 5. Evolutionary series of the lower Katun' NTC. Flooding probability: I – annually, II – once every 2 years, III – once every 2-4 years, IV – once every 4-10 years, V – once every 10-100 years, VI – extremely rare. Facies and tracts. Gravel-pebble side banks, spits, middens: 1 – devoid of vegetation; 2 – sodded; 3 – low island pebble floodplains; 5 – low sandy island floodplains with soddy layered primitive soils; 6 – sandy, with soddy layered soils; 7 – near-channel high hollow-island floodplains with soddy and meadow soils, sandy loam-sandy; 8 – low floodplain terraces, loamy-sandy, with sod-podzolic and podzolized chernozem soils; 9 – high central and terrace-like hollow-island floodplains, sandy-loamy, with meadow soils

разветвленным неустойчивым руслом. Подвижные галечные осередки (ПТК 1 и 2, рис. 5) при появлении растительности и отложении песчаных наносов трансформируются в элементарные острова низкого и среднего уровня, зарастающие кустарником и мелколесьем (ПТК 3 и 4), крупные островные массивы (ПТК 5 и 6) и береговую песчано-суглинистую ложбинно-островную пойму (ПТК 7 и 9) с луговыми и лесными комплексами. При этом режим формирования ПТК сменяется от проточного к умеренному, а врезание русла способствует

постепенной трансформации пойменных ПТК в террасовые (ПТК 9). Подвижность галечного аллювия предопределяет появление растительности только на высоких побочнях и осередках, а неустойчивость русла – возможность разрушения урочища на любом этапе его формирования и возвращения к галечным русловым формам.

Изменения руслового и гидрологического режима реки сопровождаются изменением ландшафтной структуры поймы; новая тенденция их развития приобретает направленный характер. Трансфор-

мация уже существующих ПТК продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие, соответствующее новому сочетанию факторов. Чаще всего такие процессы имеют региональный характер. Эволюционные ряды отражают вертикальные смещения природных комплексов, которые могут иметь естественные причины, но чаще всего они связаны с изменениями уровня режима при регулировании стока гидроузлами, с «посадками» уровней при карьерных разработках в русле, со строительством инженерных сооружений, регулирующих растекание воды по пойме.

Для оценки степени хозяйственного освоения пойм рек РФ была разработана 10-балльная шкала с тремя основными направлениями хозяйственной деятельности в поймах: 1) сельское хозяйство; 2) промышленно-селитебное освоение; 3) лесное хозяйство. Неиспользуемые и крайне редко посещаемые населением поймы в заповедниках, в труднодоступных верховьях тундровых, горных и таежных рек оцениваются в 0 баллов. 10 баллов означает ликвидацию поймы как физико-географического объекта: обвалование, засыпку, создание техногенной террасы с многоэтажной жилой и промышленной застройкой, городскими почвами (урбоземами), газонами, парками и скверами, искусственной системой стока воды и дренажа. Были описаны пять подобных террас — в Москве, Санкт-Петербурге в дельте Невы, в г. Междуреченске на стрелке слияния Томи и Усы, в Омске и в Ивангороде на р. Нарве, но в разной степени засыпка и обвалование пойм под жилую, промышленную и общественную застройку производятся во всех расположенных на реках крупных и средних городах.

Градация 1–2 балла подразумевает точечное и редкое использование пойменных угодий: охота, рыбалка, неорганизованный туризм с соответствующей инфраструктурой (тропы, домики, балки, кордоны, стоянки). К этой градации относятся единичные переходы ЛЭП, трубопроводов, расположенные на пойме одиночные скважины, вышки связи, лесосклады, малолюдные деревни. Основной признак ранга — отсутствие широкой сельскохозяйственной деятельности. Расположенные на бортах речной долины города и поселки, даже относительно крупные (Нарьян-Мар, Дудинка, Сунтар), на пойму почти не влияют.

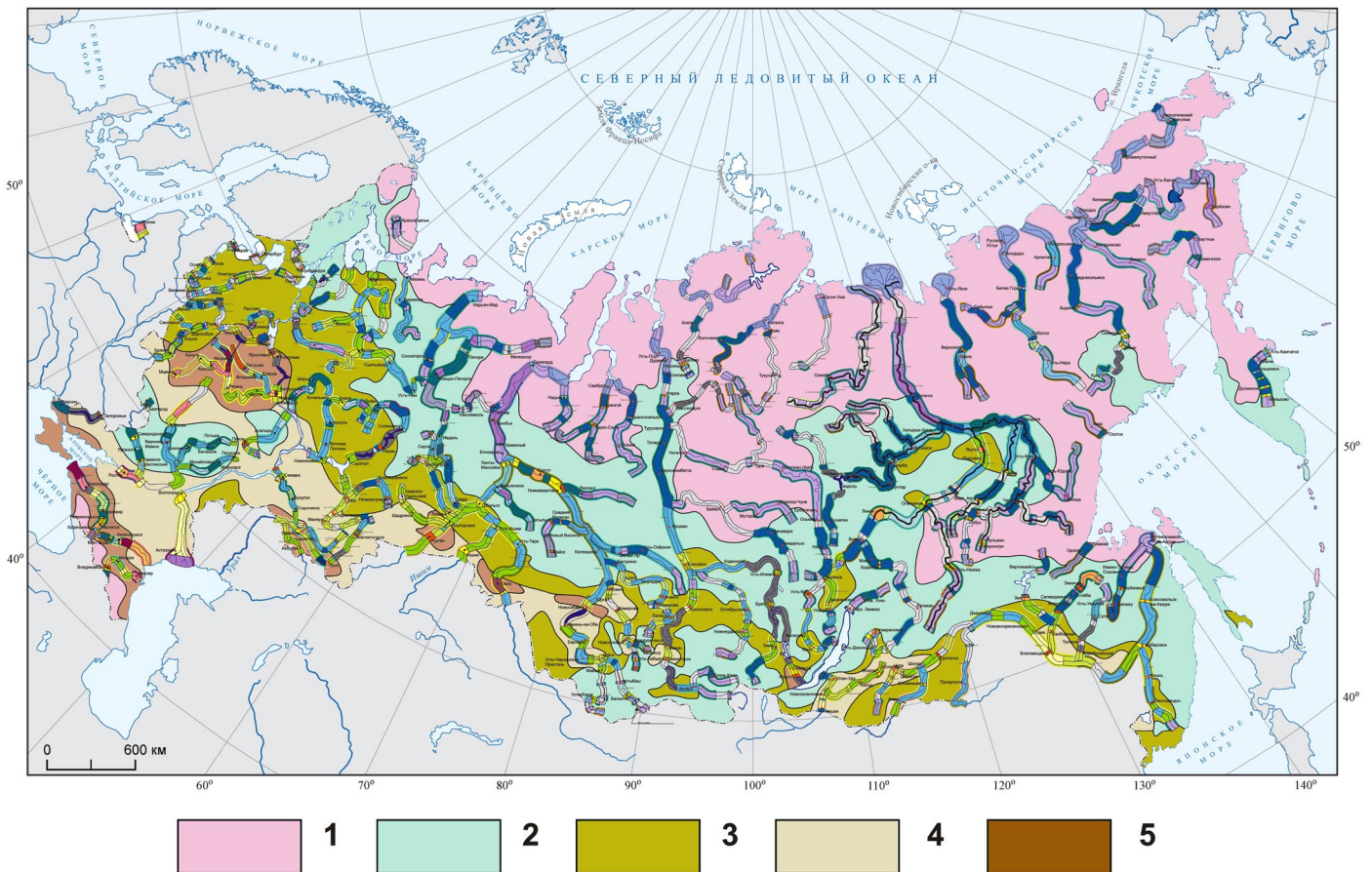
Градация 3–4 балла означает очаговое и местное использование поймы для пастбищно-сенокосного животноводства и отгонного оленеводства; 3 балла — локального, ориентированного на местные нужды, 4 — товарного, с сетью ферм, сельских поселений, связанных грунтовыми и грейдерными

дорогами, часто приподнятыми выше максимального уровня затопления, осушительными каналами. На этом уровне в городах и поселках на пойму выносятся отдельные предприятия, цеха, склады, отстойники, обычно расположенные в притеррасной зоне; судоремонтные заводы, мастерские и оборудованные портовые затоны, водозаборы — в прирусловой; связанные дорогами кусты скважин нефте- и газодобычи; единичные карьеры. Селитебного освоения поймы еще нет, промышленное — носит очаговый характер. Для лесохозяйственного освоения характерны местные вырубki и просеки, обустройство лесоперевалок — лесосклады, дороги, площадки формирования плотов и т. д. Сплошных вырубok леса на поймах не производится, за исключением некоторых речных пойм на Урале, в Карелии, Западной Сибири и Архангельской области (градация 7в).

Градация 5–6 баллов — местное использование ресурсов пойм, выходящее за пределы сельских и городских анклавов. Это сплошное использование поймы для пастбищ и сенокосов, для мелиорации на ее больших отрезках и распашка 30–50% площади. Промышленно-селитебное освоение характеризуется строительством на пойме не только промзон, но и дачных, и коттеджных поселков, прокладкой дорог на высоких насыпях, частичным обвалованием, засыпкой пойменных проток, берегозащитными сооружениями, созданием парков и скверов. Насыпи и дамбы в значительной степени ограничивают затопление поймы и разбивают ее поверхность на незатопляемые ячейки.

7–8 баллов — полная распашка и мелиорация поймы, создание полейдеров и обвалованных рисовых чеков с регулируемым водным режимом, использование пойм для садоводства, виноградарства, тепличного хозяйства; густая сеть сельских поселений, защищенных дамбами; регулируемый дамбами и водопропусками пойменный поток. На малых реках степного Крыма — Салгире, Каче, Индоле — вода зачастую отводится из основного русла в каналы в притеррасной части поймы. Этот уровень определяет почти полную застройку поймы, как малоэтажную, так и высотную. Подобная застройка ведется как на отсыпках, так и на пойменной поверхности, что не исключает периодического затопления. Естественные урочища сохраняются только на неудобьях и на охраняемых территориях.

9-балльный уровень использования поймы — ее превращение в техногенную террасу с регулируемым стоком воды и затоплением, с дамбами и отсыпками, искусственными насаждениями или городскими и дачными кварталами.



- 1 – точечное и редкое использование пойм в хозяйстве; для тундровых и горных рек – отгонно-пастбищное сезонное животноводство и оленеводство малой интенсивности, добыча полезных ископаемых в локальном масштабе
- 2 – локальное и очаговое использование пойм в хозяйстве; лесохозяйственное и местное селитебно-промышленное освоение, пастбищно-сенокосное сельское хозяйство и огороды вблизи населённых пунктов
- 3 – частичное использование пойм в хозяйстве; развитое пастбищно-сенокосное сельское хозяйство, локальная распашка, фермы, сельские населённые пункты, мелиорация, коммуникации, частичная застройка и промышленное освоение в городах и посёлках
- 4 – значительное освоение пойм, развитое многоотраслевое сельское хозяйство, распашка и застройка больших массивов, промзоны, дачное строительство, обвалование и мелиорация
- 5 – полное комплексное селитебно-промышленное и сельскохозяйственное освоение пойм, дачная, сельская и городская застройка на больших отрезках, формирование техногенных террас с искусственным водным режимом, антропогенными почвами и фитоценозами

Рис. 6. Карта-схема хозяйственной освоенности пойм больших и средних рек РФ

Fig. 6. Map-scheme of economic development of floodplains of large and medium-sized rivers of the Russian Federation

На основе балльной оценки была разработана методика картирования пойм больших и средних рек РФ, которая отражает зональность хозяйственной деятельности на них (рис. 6).

III. СТОК НАНОСОВ

Технологии изучения стока наносов

Сток наносов – связующий процесс в речном бассейне. Именно транспорт наносов водотоками всех уровней, от временных до постоянных, опре-

деляет взаимосвязь эрозии на водосборе и русловых процессов. Теория стока наносов в СССР развивалась преимущественно в двух направлениях – гидролого-географическом и гидродинамическом (ведущие научные школы в этой области сформировались в Казанском университете, ИВП РАН, на физическом факультете МГУ, в Государственном гидрологическом институте). Позже в трудах Н.И. Алексеевского была разработана теоретическая концепция, объединяющая географо-гидрологический и гидродинамический подходы к изучению

процессов формирования и перемещения наносов, учитывающая физические, географо-гидрологические особенности возникновения и трансформации потоков литогенного материала в водных объектах на локальном, региональном и глобальном уровне рассмотрения денудационных процессов (Алексеевский, 1998). Большое внимание уделялось исследованию уравнения баланса наносов для значимых частей эрозионно-аккумулятивного комплекса и эрозионно-русловой системы, в основном малых водосборов (Сидорчук, 2015). Независимо от этого в рамках геохимии ландшафтов развивалось учение о механической миграции вещества.

Выполняемые сегодня работы, основанные на разнообразных численных и натуральных технологиях измерения стока наносов, позволили существенно расширить спектр исследований стока наносов. Возникли возможности для уточнения глобальных оценок стока наносов, исследования источников поступления наносов в крупных речных бассейнах, понимания закономерностей дифференциации химического состава наносов. Таким образом, следует говорить о двух направлениях теории стока наносов, географо-гидрологическом и гидрогеохимическом, которые получили существенное развитие и определили современные исследования, выполняемые в этой области на географическом факультете МГУ.

Важнейшей вехой в развитии мониторинга характеристик стока наносов является внедрение автоматических натуральных средств и дистанционных методов. Применительно к мутности воды активно развиваются оптический (фотометрический), акустический, дистанционный и лазерный методы детектирования. Общим для всех этих средств измерения являются возможности высокого пространственного и временного разрешения и охвата, недоступные для традиционных средств. При этом разные методы дополняют друг друга: оптические методы позволяют реализовать высокочастотные измерения мутности воды (регистрируется характеристика, называемая оптической мутностью T и измеряемая стандартно в нефелометрических единицах мутности, NTU); акустические доплеровские профилографы позволяют получить распределение взвешенных частиц в пределах поперечного сечения рек на основе интенсивности отражения акустического сигнала; спутниковые снимки дают информацию о приповерхностной мутности воды на больших площадях водных объектов.

Все методы основаны на разных закономерностях отражения (рассеяния) света от частиц, взвешенных в воде. Зависимость этих свойств отраже-

ния (рассеяния) зависит от размера и формы этих частиц, их минералогического и петрографического состава, наличия органики и др., что определяет региональные особенности пересчета косвенных характеристик в значения весовой мутности (SSC , мг/л). Применительно к оптическим методам используется линейная аппроксимация (Алексеевский и др., 2013; Ankcorn, 2003; Chanson, Takeuchi, Trevethan, 2008; Gippel, 1995; Gray, Gartner, 2009; Pavanelli, Bigi, 2005) между переменными:

$$SSC = \alpha + \beta T, \quad (1)$$

где α и β – эмпирические параметры.

Рядом авторов используется также степенная (Davies-Colley, Smith, 2001; Lewis, 1996; Zimmermann, Lapointe, 2005) и логарифмическая (TMDL team, 2006; Lewis, 2001) зависимость. Региональные зависимости между SSC и T рассмотрены в работах (Белозерова, Чалов С.Р., 2013; Промахова, 2016) и обобщены в (Чалов, 2024). В общем случае, при четком подборе рек-аналогов, в первую очередь по генезису взвеси и ее крупности, сходным геолого-геоморфологическим особенностям и режиму хозяйственной деятельности, возможно использование типовых региональных зависимостей.

Сложные картины распределения взвесей в русловом потоке открываются с помощью лазерных дифрактометров, помимо мутности воды измеряющих крупность взвесей. Измерение гранулометрического состава взвесей с помощью лазерной дифракции заключается в следующем: мощность создаваемого лазерного луча измеряется специальным датчиком (LREF); затем луч подвергается коллимации (COL), то есть создается параллельно идущий поток излучения. Далее лазерный луч проходит через пропускающее стекло (TW) и попадает в среду (SV), где рассеивается на частицах под разными углами. Светофильтр используется для подавления дневного света, причем углы после рассеяния частицами не изменяются. После этого рассеянные отфильтрованные лучи попадают в фокальную плоскость приемного объектива, где установлена фокусирующая линза (FL), которая перенаправляет лучи на кольцевой детектор (RD), представляющий собой набор кремниевых 60-градусных дуг, где каждая дуга охватывает небольшой диапазон углов рассеяния, а кольцевидная форма используется для достижения стабильности инверсии. Происходит преобразование набора измерений рассеяния света под многими углами в гранулометрический состав. Проведенные тестовые измерения прибора на малых реках Москвы (Чалов, Лошков, Крастынь, 2024) показали исключительную перспективность его применения.

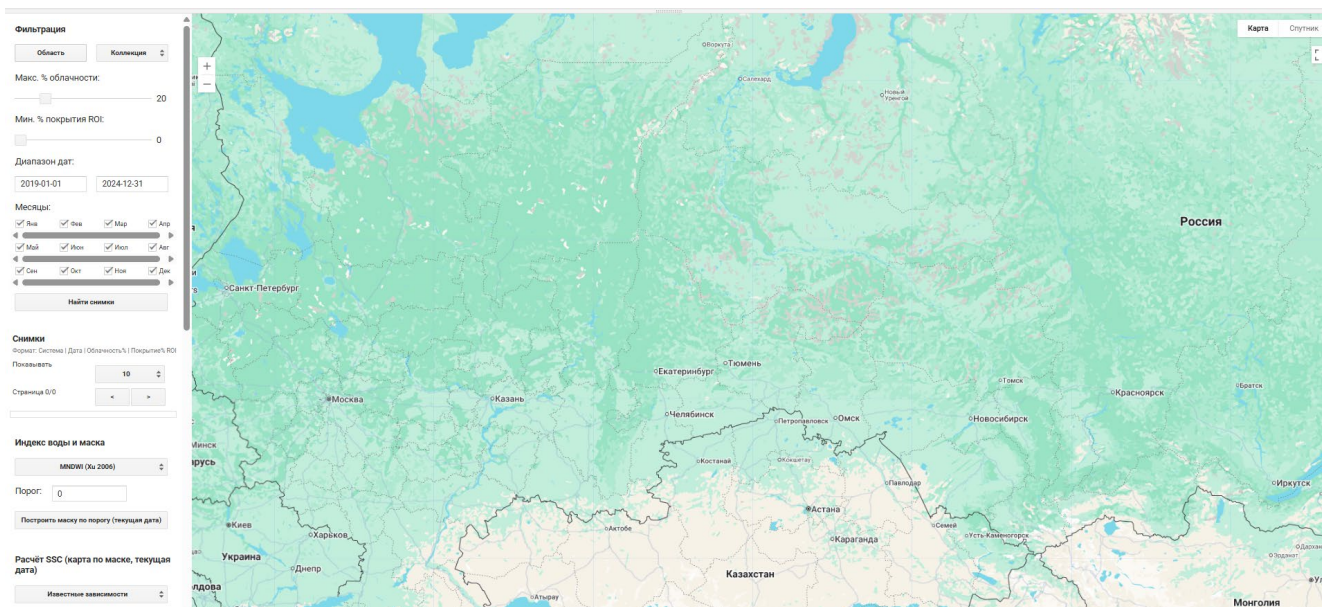


Рис. 7. Общий вид программного модуля TripleS на платформе Google Earth Engine

Fig. 7. General view of the TripleS software module on the Google Earth Engine platform

Наконец, в последние годы значительно выросла роль применения дистанционных данных в изучении стока наносов. Изучение характеристик поверхностных вод, в том числе мутности воды, с помощью методов дистанционного зондирования проводится относительно давно (Carlson, 1976; Nduaguba D.C., 1976; Кравцова и др., 1974; Лабутина и др., 1976). В их основе лежит сопоставление значений коэффициентов спектральной яркости пикселей, полученных в спектре разных длин волн, с измеренной мутностью воды, что позволяет получить региональные или потенциально — универсальные зависимости для расчета мутности поверхностных вод по снимкам. В то же время в последние годы значительно увеличилась возможность автоматизации этого метода. В НИ-Лаборатории эрозии почв и русловых процессов был разработан программный модуль Surface Suspended Sediment (TripleS) для автоматизированного определения мутности воды по спутниковым снимкам Landsat и Sentinel. Разработка была обусловлена необходимостью превратить дистанционные оценки мутности воды из набора разрозненных процедур в целостный исследовательский подход. Несмотря на высокую информативность спутниковых данных, их использование в работах по мутности воды и стоку взвешенных наносов долгое время оставалось трудоемким и несистемным: значительная часть усилий уходила на подготовку и согласование материалов.

Создание TripleS позволило объединить этапы обработки в единой рабочей среде и тем самым сделать возможным регулярный анализ больших архивов спутниковых наблюдений Landsat и Sentinel за много лет.

TripleS реализован на платформе Google Earth Engine (GEE) в виде интерактивного JavaScript-приложения; его общий вид представлен на рис. 7. Выбор платформы GEE определяется тем, что она объединяет доступ к многолетним архивам спутниковых данных и вычислительные ресурсы для их обработки, что хорошо зарекомендовало себя в научных исследованиях.

Доступ к приложению осуществляется через веб-интерфейс Code Editor без необходимости локальной установки программного обеспечения. TripleS работает с двенадцатью коллекциями спутниковых снимков, доступными непосредственно в каталоге GEE: Landsat 4—9 (уровни обработки TOA и SR, коллекция C02) и Sentinel-2 (уровни L1C и L2A, гармонизированные коллекции). Для выделения водной поверхности реализованы пять индексов: MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), LSWI (Land Surface Water Index), а также AWEI (Automated Water Extraction Index) в двух модификациях — без учета теней (AWEI_{insh}) и с их учетом (AWEI_{ish}). Пороговое значение индекса задается пользователем вручную, что позволяет адаптировать маску воды к конкретным условиям

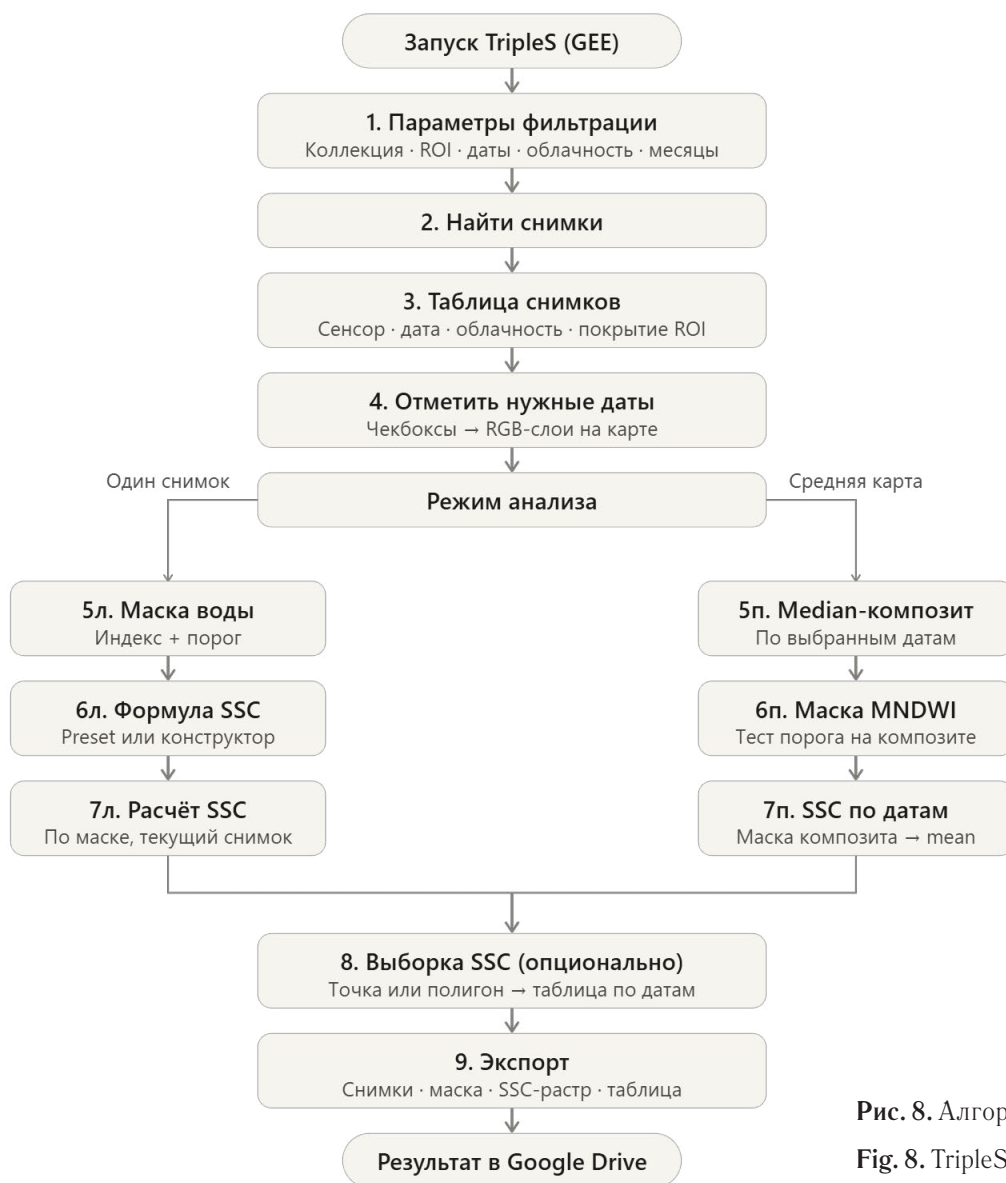


Рис. 8. Алгоритм работы модуля TripleS
Fig. 8. TripleS module operation algorithm

съемки. Расчет концентрации взвешенных веществ выполняется по набору из более чем тридцати эмпирических зависимостей, калиброванных для различных речных систем мира, либо по пользовательской формуле, задаваемой в конструкторе выражений. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 8.

Исследования баланса наносов крупных речных бассейнов

Новые технологии привели к появлению данных о балансе наносов как малых, так и крупных речных бассейнов. Важным направлением исследований стали временные реконструкции баланса наносов, позволившие восстановить трансформацию источников поступления наносов в реки в связи с гидроэ-

нергетическим строительством или развитием горнодобывающей деятельности. Много работ было направлено на оценку (в том числе сравнительную) баланса наносов речных бассейнов (Hinderer, 2012; Tena and Batalla, 2013; Frings et al., 2014; Reid and Dunne, 2016). Мы сопоставили характеристики стока взвешенных наносов WR рек бассейна Дона ($n = 28$) и Оби ($n = 26$) с расчетными значениями объемов бассейновой эрозии водосборов $W_{эр}$. На рис. 9 показано отношение стока наносов и различных процессов формирования стока наносов (K) относительно площади водосборов F . В оценку включены показатели эрозии на водосборе ($K_{эр}$), эрозии на водосборе и в руслах рек ($K_{эр} + K_{русл}$); эрозии на водосборе и деятельности ледников ($K_{эр} + K_{ледн}$); эрозии на водосборе и в руслах рек и объема

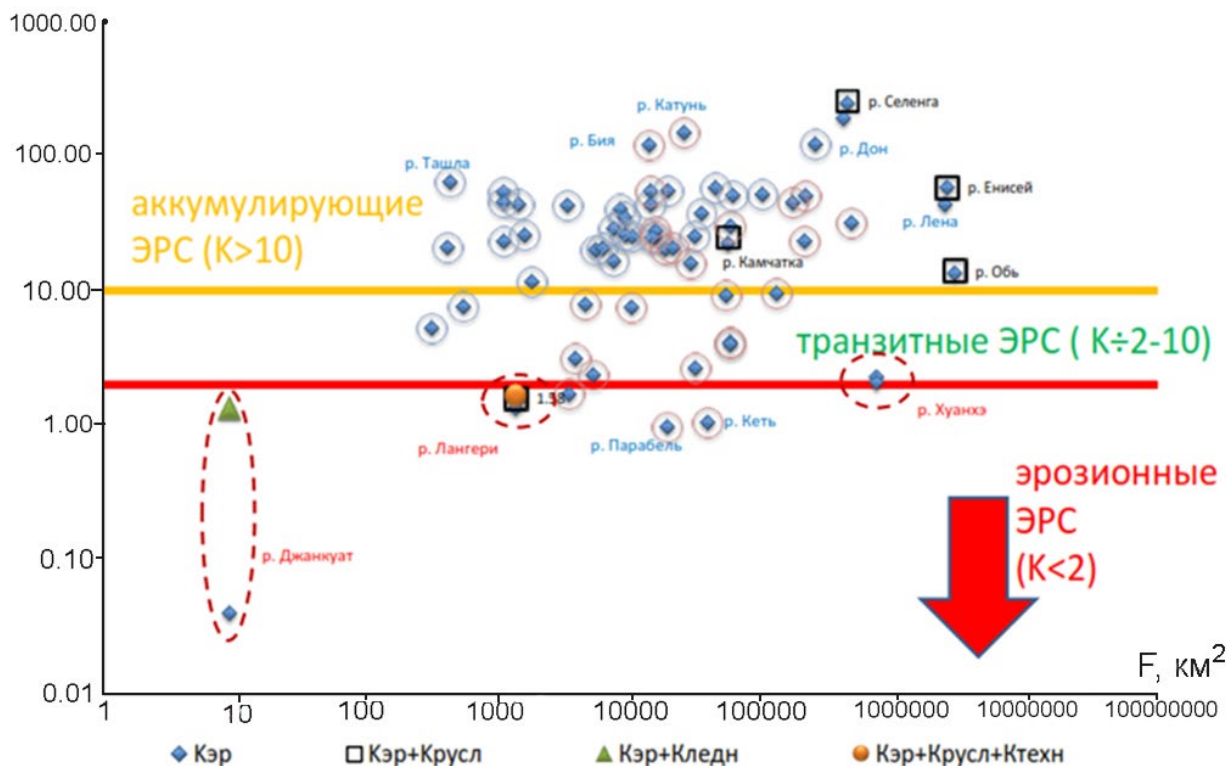


Рис. 9. Связь площади ЭРС F и коэффициентов масштабной редукции K для рек России, оцененных относительно разных источников перемещения массы грунта. Синими кругами обведены посты в бассейне р. Дон, красными — в бассейне р. Обь. Обозначения в тексте

Fig. 9. Relationship between the area of the ERS F and the scale reduction factors K for Russian rivers, estimated relative to different sources of soil mass movement. Blue circles indicate stations in the Don River basin; red circles indicate stations in the Ob River basin. Legend in the text

техногенных потоков наносов, связанных с горнодобывающей деятельностью ($K_{эp} + K_{русл} + K_{техн}$). В бассейнах малых рек ключевую роль играют местные факторы формирования стока наносов — ледниковая экзарация (р. Джанкуат) или объемы техногенного стока, например, сбросы сточных вод с территорий разработок (р. Лангери). Именно в этом масштабе существуют эрозионные водосборы, где объемы выноса за пределы системы превосходят объемы аккумуляции ($K < 2$). Существуют примеры эрозионных бассейнов и у более крупных рек. К ним относится бассейн р. Хуанхэ, где до проведения противоэрозионных мероприятий $K_{эp}$ был равен 2, а в условиях снижения эрозии в результате масштабных противоэрозионных мероприятий с 2.23×10^9 до 1.7×10^9 и сокращения стока наносов р. Хуанхэ с 1.08×10^6 до 0.75×10^6 т/год (Chalov et al., 2018) $K_{эp}$ увеличился до 2.24 (трансформация режима от транзитного в транзитно-аккумуляционный). Важнейшую роль в этом сыграла аккумуляция наносов в водохранилищах. Зависимость $K = f(F)$ отражает влияние широтной зональности на закономерности баланса наносов. В пределах южных

освоенных территорий величины $K_{эp}$ значительно выше по сравнению с северными территориями. Так, для рек бассейна Оби $K_{эp}$ меняется от 1 до 146 (среднее — 26.5, $n = 25$), в бассейне р. Дон — от 5 до 121 (среднее — 36.2, $n = 28$). При этом максимальные значения ($K > 100$) на территории бассейна Оби характерны для самых южных и наиболее освоенных ее притоков — бассейнов р. Катунь и р. Бии. Среди вошедших в оценку водосборов самые высокие значения K характерны для бассейна р. Селенги, где показатель эродированности почв характеризуется экстремальными значениями в 90%, связанными с тем, что от 70 до 90% площади степных и лесостепных районов в начале 90-х гг. XX в. находилось под сельскохозяйственными угодьями (Баженова, Кобылкин, 2013), и одновременно на значительной части бассейна наблюдался перевыпас скота (Onda и др., 2007).

Исследования стока наносов крупнейших рек выявили упомянутую выше закономерность того, что сток наносов в крупнейших бассейнах рек РФ (Оби, Енисея, Лены и Колымы) в современных гидроклиматических условиях значительно ниже мас-

сы наносов, перемещаемых эрозионными процессами на водосборе и в руслах рек (Chalov, Ivanov, 2023). Объемы бассейновой и русловой эрозии (1400 Мт/год для Оби, 331 Мт/год для Енисея, 1100 Мт/год для Лены) и сток наносов в замыкающих створах этих рек (63.5 Мт/год для Оби, 32.5 Мт/год для Енисея и 38.6 Мт/год для Лены) отличаются на порядок значений. По мере роста бассейна доля аккумуляции наносов в результирующем балансе увеличивается. Составляющие баланса наносов подчиняются широтной зональности. Интерактивная база данных о динамике берегов рек Северной Евразии представляет собой обобщение сведений по более чем 140 000 км русел и 626 772 участкам рек Вислы, Волги, Урала, Сакмары, бассейна Оби, Оки, Надыма, бассейна Енисея, бассейна Лены, Индигирки, Яны, Мессояхи, бассейна Колымы, Амура, Камчатки, малых рек Московского региона, бассейна Кудьмы, бассейна Селенги и Уссури. В ней объединены результаты полевых измерений, дешифрирования спутниковых снимков (Landsat, Sentinel, Keyhole) и аэрофотосъемки с беспилотных

летательных аппаратов и сведены такие данные по участкам рек (длиной от 100 м до 2 км), как: средние и максимальные скорости отступления берегов (м/год); площади и объемы размыва; вынос наносов в результате боковой эрозии. Описание базы данных опубликовано в журнале Earth System Science Data (Q1; Journal Impact Factor 2024: 11.6; 5-летний IF: 13.9), а также в виде открытой системы <https://map.giscarta.com/viewer/93a6a4b3-179f-450f-be02-a31ca6db245b> и репозитория <https://zenodo.org/records/15965461>.

На основе интерактивной базы даны оценки степени увеличения характеристик размывов берегов рек криолитозоны по сравнению с реками за ее пределами — рек бассейнов Оби, Енисея, Лены и Колымы. Выявлено, что масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, площади размывов и скорости отступления берегов в криолитозоне оказались на 40–55% выше, чем за ее пределами (рис. 10). Статистический анализ с применением критерия Манна — Уитни выявил значимые различия (p -value < 0.05) в характеристиках

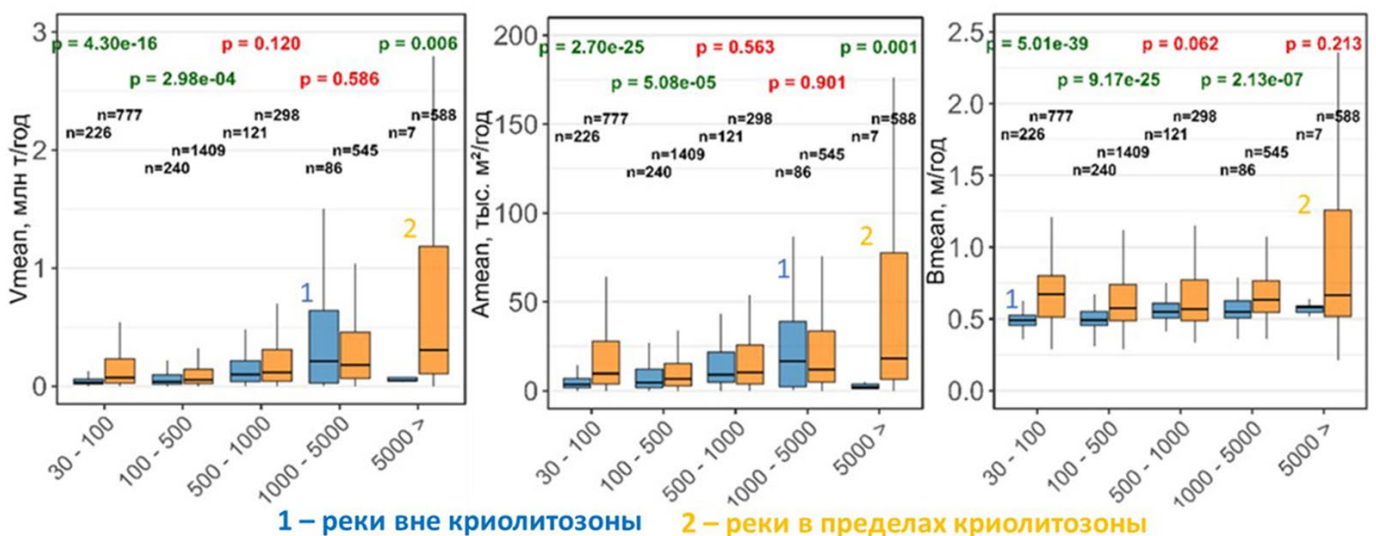


Рис. 10. Диаграмма размаха для параметров русловой эрозии: совместное влияние расходов воды и мерзлотных условий. n — количество 10-км участков русла, p — p -value критерия Манна — Уитни, значимость различий между характеристиками русловых деформаций в криолитозоне и за ее пределами: зеленый — значимые различия, p -value < 0.05; красный — незначимые различия; статистика размывов, приведенная на диаграмме размаха: белый прямоугольник — границы 25% и 75% квантилей (Q1 и Q3), жирная линия внутри — медианное значение; линиями, отходящими вниз и вверх от прямоугольников, обозначены доверительные интервалы, равные $\pm 2,7\sigma$

Fig. 10. Boxplot for channel erosion parameters: the combined effect of water discharge and permafrost conditions. n is the number of 10-km channel sections, p is the Mann-Whitney U-test p -value, and the significance of differences between channel deformation characteristics in and outside the permafrost zone: green indicates significant differences, p -value < 0.05; red indicates insignificant differences. Erosion statistics presented in the boxplot: the white rectangle represents the 25% and 75% quantiles (Q1 and Q3), the thick line inside represents the median value; the lines extending downward and upward from the rectangles indicate confidence intervals equal to $\pm 2,7\sigma$

руслых деформаций для участков русла в криолитозоне и вне ее для всех групп расходов, кроме диапазона 500–1000 м³/с (рис. 10). Для малых и средних рек все характеристики размывов значительно выше в криолитозоне. Для рек со среднегодовым значением расхода воды в диапазоне (30–100 м³/с) масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, на 45% больше в криолитозоне, чем за ее пределами (медианное значение составляет 85 тыс. т/год, за пределами криолитозоны – 58 тыс. т/год), площадь размывов больше на 50% (11.2 тыс. м²/год в криолитозоне против 7.5 тыс. м²/год за ее пределами), линейное отступление берегов больше на 55% (0.72 м/год в криолитозоне и 0.46 м/год за ее пределами); для рек с расходом воды в диапазоне от 100 до 500 м³/с масса наносов, поступающих в результате русловой эрозии в криолитозоне, больше на 40% (78 тыс. т/год в криолитозоне против 55 тыс. т/год за ее пределами), площадь размывов больше на 38% (9.8 в криолитозоне и 7.1 тыс. м²/год за ее пределами), отступление берега больше на 42% (0.68 м/год в криолитозоне и 0.48 м/год за ее пределами). Для больших рек (1000–5000 м³/с) статистическое различие наблюдается только для линейного отступления берегов: в криолитозоне отступления больше на 60% (0.92 м/год против 0.58 м/год), хотя наблюдаются и статистически незначимые различия как по массам наносов, поступающих в результате русловых деформаций (210 тыс. т/год против 225 тыс. т/год), так и по площадям размывов (18.5 тыс. м²/год против 20.1 тыс. м²/год). Для самых крупных рек в криолитозоне (>5000 м³/с) масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, выше на 50% (1250 тыс. т/год против 830 тыс. т/год), площадь размывов выше на 55% (95 тыс. м²/год против 61 тыс. м²/год, $p = 0,001$); для скорости отступления берега значимые различия не выявлены.

Гидрогеохимические исследования речных наносов

В гидролого-геохимических исследованиях можно выделить несколько основных направлений: оценка содержания химических веществ и соединений в составе речных наносов; определение источников поступления взвешенного вещества в реки и оценка загрязнения речных наносов в речных бассейнах; исследование гидродинамических закономерностей дифференциации химического состава наносов.

Определение химического состава взвешенных наносов – актуальная тема как фундаментальных, так и прикладных исследований. Учитывая тот факт, что системы государственного стационар-

ного мониторинга во всем мире ориентированы на растворенные формы химических веществ, изученность химического состава взвесей – белое пятно в исследованиях русловых потоков. Концентрации химических элементов в речных наносах зависят от распространенности химических элементов и от особенностей их коэффициента подвижности в данных условиях, гидрологической обстановки, характера русловых процессов, что определяет их высокую пространственную и временную вариабельность. Активное развитие аналитической химии (появление масс-спектрального анализа) определило возможности создания массивов данных о составе взвешенных наносов и на основе региональных исследований позволило получить ряд обобщений о химическом составе взвешенных наносов. В работе В.В. Гордеева, датированной 1978 г. и в дальнейшем опубликованной в 2009 г. (Гордеев, 2009), приведен средний химический состав взвесей рек мира, основанный на материалах по 100 рекам. В работе В.С. Савенко (Савенко, 2006) были суммированы данные о среднем содержании оксидов главных петрогенных элементов во взвесах 128 рек мира, а также микроэлементов и биогенов. Последнее крупное обобщение выполнено в работе (Viers, Dupré, Gaillardet, 2009) и для некоторых элементов включает в себя данные до 164 рек. С учетом вариабельности состава взвешенных наносов более перспективными представляются детальные региональные исследования. Подобная программа, в 2018–2021 гг. охватившая разные фазы водного режима, была реализована в нижнем течении крупнейших рек России – Оби, Енисея, Лены и Колымы – и привела к появлению наиболее подробной оценки состава наносов (табл. 4). Сведения о химическом составе взвешенных наносов лежат в основе исследований происхождения речных наносов в бассейнах. Для них традиционно используют относительные коэффициенты концентрации K_c , показывающие, во сколько раз содержание элемента x в речных наносах C_i превышает их кларковые или фоновые значения C_0 , либо концентрационные функции речных наносов, показывающие отличие содержания элемента в наносах от содержания элемента в составе пород, слагающих бассейн. Показательны также характеристики расхода взвешенных и влекомых наносов и характеристики гранулометрического состава наносов. В частности, модальность распределения гранулометрического состава (экстремумы функции распределения i -той фракции в составе наносов) характеризует наличие преобладающих источников разного типа, в частности бассейновой и более крупной русловой фракции (Чалов, Ефимов, 2021). Применение подобной оценки для крупнейших арктических рек (Обь, Енисей,

Таблица 4. Содержание ММ (металлов и металлоидов) в составе взвешенных наносов и средние расходы ММ в период открытого русла в замыкающих створах рек

Table 4. Content of ММ (metals and metalloids) in the composition of suspended sediments and average ММ discharges during the open-channel period in the outlet sections of rivers

Элемент	Средние концентрации ММ в период открытого русла, мкг/г			
	Обь (n = 78)	Енисей (n = 60)	Лена (n = 67)	Колыма (n = 230)
Fe	66 215	46 508	60 648	45 427
Al	55 790	50 334	99 249	72 695
Mn	2751	1239	2386	1812
Zn	270	141	254	194
Sr	145	198	292	159
Cr	100	101	119	104
Zr	92	60	140	90
V	87	87	129	125
Ni	50	52	56	40
Cu	35	45	46	37
Pb	27	19	31	25
As	24	4.92	8.66	21
Co	18	21	25	16
Sn	6.89	2.20	3.17	5.03
Cs	3.84	2.65	4.71	4.57
U	2.09	2.05	3.78	2.04
W	1.01	0.62	1.50	1.23
Sb	0.94	0.81	0.58	1.23
Cd	0.36	0.38	1.33	0.33
Mo	0.20	1.06	0.90	1.48

Лена и Колыма) позволило установить, что бассейновая составляющая стока взвешенных наносов в нижнем течении рек меняется от 34 (Енисей) до 62% (Колыма). Доля бассейновой составляющей увеличивается во взвесах Лены и Колымы за счет поступления продуктов разрушения обнажений многолетнемерзлых пород (едом) в бортах долин и антропогенной деятельности (рис. 11).

Актуальной тематикой становится изучение происхождения органического углерода и его миграции по русловым потокам. Считается, что в метровом слое почв захоронено около $1550 \cdot 10^9$ т органического углерода и $950 \cdot 10^9$ т неорганического углерода, что почти в 3 раза больше, чем объем

углерода в атмосфере (Lal, 2004). В результате разрушение почвы приводит к мобилизации огромных количеств органического углерода, и этот процесс дополнительно усиливается за счет высвобождения древнего углерода, захороненного в толще многолетнемерзлых пород, имеющих тенденцию к массовому разрушению в арктических бассейнах (Chalov и др., 2025). Существующие глобальные базы данных о содержании взвешенного углерода в почвах (Hengl et al., 2017) в совокупности с моделями бассейновой и русловой эрозии позволяют выполнить покомпонентную оценку эрозионных источников поступления углерода в реки. В глобальном масштабе выполненные оценки (Zheng et al., 2025) свидетельствуют о том, что в Мировой океан поступает около $0.71-1.06 \cdot 10^9$ т углерода, что составляет 3–5% от стока наносов рек мира (Чалов, 2025). Наши расчеты годового поступления взвешенного углерода в крупные водохранилища Сибири показали, что в Колымское водохранилище поступает $1.195 \cdot 10^6$ тС/год, в Саяно-Шушенское – $1.741 \cdot 10^6$ тС/год, в Богучанское – $0.110 \cdot 10^6$ тС/год, в Зейское – $0.848 \cdot 10^6$ тС/год, в Бурейское – $0.535 \cdot 10^6$ тС/год. Русловая составляющая определяет от 12.1 до 38.5% формирования потоков ВОУ. При этом ближайшими задачами в развитие этой темы являются внедрение расчетной схемы в климатические модели (Дымников и др., 2022), верификация расчетов по данным мониторинговых наблюдений.

Наконец, третье направление гидрогеохимических исследований речных наносов было определено появлением эмпирических данных о распределении концентраций химических элементов в составе речных наносов в пределах локальных участков рек. Актуальность этих исследований определена тем, что вариабельность концентраций химических элементов и соединений в пределах поперечного сечения крупных рек превышает их сезонную и многолетнюю изменчивость. Так, коэффициенты вариации ряда значений концентрации микроэлементов в створе р. Колымы, по данным исследований 2019–2021 гг., превышали коэффициенты вариации этих же веществ для ряда из еженедельных концентраций (Ефимов и др., 2019). Существующие данные о распределении концентрации микроэлементов в составе взвешенных наносов по глубине рек (Chalov и др., 2020) позволяют предположить существование разных характерных систем распределения разных групп элементов в зависимости от их приуроченности к крупным или мелким фракциям речных наносов. Развитие этого направления исследований имеет важнейшее значение для организации мониторинга качества речных вод, особенно на крупных реках.

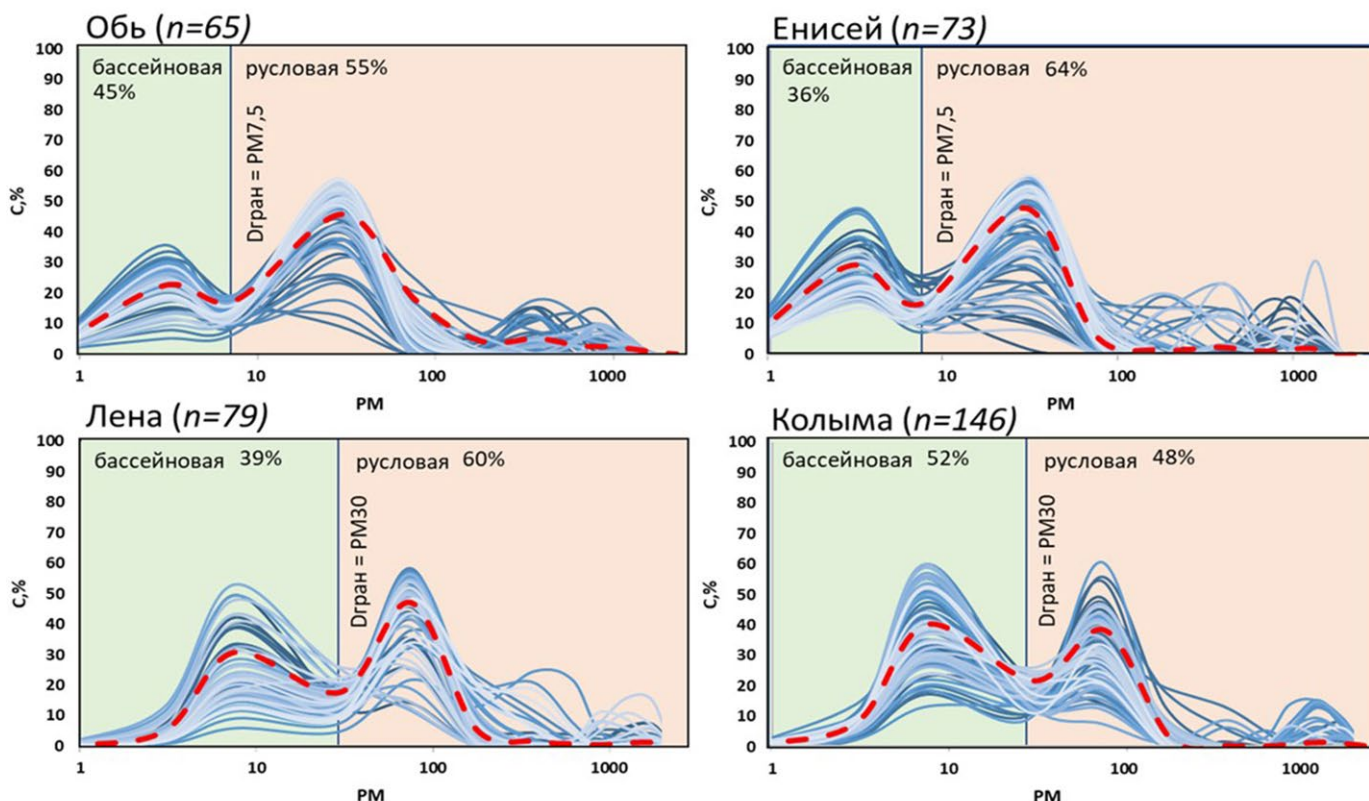


Рис. 11. Определение бассейновой и русловой фракций по данным гранулометрического состава

Fig. 11. Determination of basin and channel fractions based on granulometric composition data

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнутый прогресс в области количественных оценок смыва на пахотных землях обусловлен широким использованием данных дистанционного зондирования, что позволило получать достаточно детальные данные о ряде ключевых факторов эрозии почв на обширных пространствах. Однако дальнейшее совершенствование эрозионных моделей ограничивается отсутствием данных о водопроницаемости почв при различных типах их обработки, а также после уборки урожая. Сбор и систематизация данных о водопроницаемости почв позволят значительно повысить точность расчетов смыва на основе использования уже имеющихся физически обоснованных эрозионных моделей. Разработанная в НИЛабораии эрозии почв и русловых процессов технология применения повторного пробоотбора цезия-137 на обрабатываемых малых водосборах является перспективным направлением для оценки изменений темпов перераспределения наносов за различные интервалы времени. Внедрение методов машинного обучения, которые в настоящее время стали широко применяться, в том числе в науках о Земле, будет использоваться для картографирования процессов денудации в бассейнах горных рек, где поставщиком наносов с площади водосборов

является широкий набор экзогенных процессов. Это, наряду с дальнейшим совершенствованием расчетов связанности потоков наносов, позволит расширить достоверность расчетов бассейновой составляющей в стоке наносов малых и транзитных рек в горных странах.

Исследования пойм неразрывно связаны с изучением русловых и гидрологических процессов. Развитие русловедения во второй половине XX – первой половине XXI в. неопровержимо доказало неразрывную связь пойм с процессами в русле формирующей их реки. Это дало импульс новому направлению исследования пойм – структурно-динамическому, которое активно развивается в НИЛабораии эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева. Оно призвано рассматривать пойменные природные и природно-техногенные комплексы (и, шире, пойменно-русловые комплексы) как чрезвычайно подвижный объект, во всех видах его взаимодействия с окружающей средой, и развивать ландшафтно-индикационное направление в поймоведении. Динамика почвенно-растительного покрова и ландшафтов в целом рассматривается как показатель направленности, интенсивности, многолетнего и сезонного режима русловых деформаций и гидрологического режима

реки. Это позволяет, например (при ограниченности картографических материалов), восстанавливать рельеф поймы по мозаике ее природных урочищ, что с успехом применяется при создании и корректировке цифровых моделей рельефа. Внедрение методов математического моделирования в изучение пойменных, гидрологических и русловых процессов к настоящему времени превратилось в обязательный этап как фундаментальных исследований, так и рассмотрения прикладных вопросов. Все чаще современные подходы к изучению пойменно-русловых комплексов находят применение в разных отраслях народного хозяйства: научное обоснование проектных решений при строительстве мостовых переходов, водозаборных узлов, берегозащитных и противопаводковых сооружений; управление русловыми процессами в целях минимизации ущерба от гидрологических явлений (затопление, русловые деформации, ледовые заторы); разработка методов улучшения условий судоходства на внутренних водных путях РФ.

Транспорт наносов временными и постоянными водотоками выступает ключевым связующим звеном между эрозией на водосборах и русловыми процессами. Современные достижения в области численных методов и натурных измерений существенно расширили возможности изучения стока наносов, позволив уточнить его глобальные оценки, выявить источники поступления вещества и установить закономерности пространственной дифференциации химического состава. Внедрение автоматизированных средств и дистанционных методов стало важнейшим этапом развития мониторинга характеристик стока наносов, обеспечив получение данных о балансе наносов в речных бассейнах различных масштабов и возможность реконструкции его временной динамики в условиях возрастающего антропогенного воздействия. Установлено, что в крупнейших бассейнах России наблюдается несоответствие между объемами эрозионного материала и фактическим стоком наносов, что указывает на сложность внутрибассейновых процессов эрозии, аккумуляции и перераспределения. Особую актуальность приобретают исследования химического состава взвешенных наносов, а также происхождения и миграции органического углерода, играющих важную роль в формировании качества речных вод и глобальных биогеохимических циклов. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших регионально ориентированных исследований и совершенствования систем мониторинга, направленных на комплексное понимание трансформации эрозионно-русловых систем в современных гидроклиматических и антропогенных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова 1.13 «Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений».

ЛИТЕРАТУРА

Алабян А.М., Беликов В.В., Крыленко И.Н., Фингерт Е.А., Фёдорова Т.А. Ретроспективное моделирование экстремального наводнения на реке Ока в городе Рязани и оценка воздействия на городскую и транспортную инфраструктуру // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № S1. С. 1–10.

Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: изд-во МГУ, 1998. 202 с.

Алексеевский Н.И., Белозерова Е.В., Касимов Н.С. и др. Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне Селенги в период дождевых паводков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. Т. 3. № 3. С. 60–65.

Алексюк А.И., Малахов М.А., Беликов В.В. Решатель задачи Римана для уравнений мелкой воды с разрывным дном // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660617, 2020.

Анненская Г.Н. Применение ландшафтного метода при изучении пойм крупных рек // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1963. № 4. С. 32–37.

Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И. и др. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69.

Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеопиздат, 1988. 456 с.

Безухов Д.А., Голосов В.Н., Панин А.В. Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-Европейской равнины // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 4. С. 73–84. DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84.

Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.

Беликов В.В., Васильева Е.С., Малюгин Н.Р., Головлев П.П., Завадский А.С. Численное моделирование работы берегозащитных сооружений на

участке р. Нюкжи // Гидротехническое строительство. 2025. № 12. С. 47–55.

Белозерова Е.В., Чалов С.Р. Определение мутности речных вод оптическими методами // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2013. Т. 6. № 5. С. 39–45.

Беркович К.М., Злотина Л.В., Рязанов П.Н. Эволюционный ряд островных и прирусловых природных территориальных комплексов поймы верхней Оби // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1983. № 2. С. 82–88.

Гирло Е.М., Чалов С.Р., Харченко С.В. Оценка поступления взвешенного вещества в реки методом трассировки источников наносов для решения задач управления урбанизированным водосбором // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 26–51.

DOI: 35567/1999-4508-2025-6-26-51.

Голосов В.Н. Количественная оценка перераспределения наносов в верхних звеньях флювиальной сети: достижения и проблемы // Геоморфология. 2008. № 3. С. 29–37.

Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М., ГЕОС. 2006. 296 с.

Голосов В.Н., Жидкин А.П., Петелько А.И. и др. Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований малого водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область) // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1321–1338.

Голосов В.Н., Кумани М.В., Иванова Н.Н. и др. Заиливание малого водохранилища в условиях климатических изменений и урбанизации водосбора (Поповский пруд, г. Курск) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 6. С. 51–62.

Голосов В.Н., Шамшурина Е.Н., Колос Г.И. и др. Пространственно-временные изменения эрозионно-аккумулятивных процессов на малом водосборе в северной части Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2024. № 5. С. 738–754.

Гордеев В.В. Система река – море и ее роль в геохимии океана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.28. М.: РАН.; 2009. 36 с.

Грин А.М. Опыт стационарного изучения процессов стока и смыва. Современные экзогенные процессы рельефообразования. М.: Наука, 1970. С. 89–95.

Добровольский Г.В., Балабко П.Н., Стасюк Н.В. и др. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 5–13.

Дымников В.П., Залесный В.Б., Глазунов А.В., Степаненко В.М. Модели климата, геофизических пограничных слоев и деятельного слоя суши: памя-

ти В.Н. Лыкосова // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 4. С. 375–383. DOI: 10.31857/S0002351522040046

Ефимов В.А., Чалов С.Р., Магрицкий Д.В., Ефимова Л.Е. Оценка стока воды, концентраций наносов и химических веществ в устье реки Колымы по результатам полевых исследований 2019 г. // ЧЕТВЕРТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ. ГИДРОЛОГИЯ ОТ ПОЗНАНИЯ К МИРОВОЗЗРЕНИЮ. Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. СПб: Изд-во Санкт-Петербургский государственный университет, 2019. С. 1064–1069.

Жучкова В.К. Организация и методы комплексных физико-географических исследований. М.: МГУ. 1977. 186 с.

Жучкова В.К., Раковская Э.М. Методика комплексных физико-географических исследований. М.: Центр «Академия». 2004. 354 с.

Завадский А.С., Сурков В.В., Самохин М.А. Изменение режима затопления левобережной поймы р. Лены в районе г. Якутска // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. № 4. С. 110–124.

Завадский А.С., Сурков В.В., Чернов А.В. и др. Природные территориальные комплексы поймы р. Москвы в нижнем течении в условиях интенсивного хозяйственного использования // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 3–13.

Завадский А.С., Сурков В.В., Чернов А.В. и др. Трансформация пойменных ландшафтов под влиянием природных и антропогенных изменений окружающей среды (на примере Захарковской поймы р. Москвы) // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31. № 2. С. 166–177.

Завадский А.С., Фингерт Е.А., Ботавин Д.В., Головлев П.П. Современные подходы к обоснованию генеральных схем коренного улучшения судоходных условий (на примере сложноразветвленного участка реки Лены) // Гидротехнические сооружения водных путей: Сб. науч. тр.: Вып. 4. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. 2019. С. 148–160.

Злотина Л.В. Формирование и развитие пойменных геоккомплексов на участках с различной устойчивостью русла (на примере верхней и средней Оби) // Деп. ВИНТИ. 1989. № 4679-89. 10 с.

Иванов М.М., Иванова Н.Н., Голосов В.Н. и др. Оценка изменений Чернобыльского загрязнения и темпов смыва пахотных почв путём повторного обследования // Почвоведение. 2024. № 9. С. 1251–1262.

- Кедич А.И., Голосов В.Н., Харченко С.В. Экзогенные процессы в прогляциальных зонах гор: количественные оценки и их точность // Учёные записки Казанского государственного университета. Серия Естественные науки. 2022. Т. 164, № 1. С. 109–134.
- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В. и др. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат. 1959. 372 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
- Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Головлев П.П., Сазонов А.А., Никитский А.Н. Верификация двумерной гидродинамической модели р. Лены у г. Якутск по разновременным данным космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 169–178.
- Кравцова В.И., Антонова С.Ю. Применение многозональной съемки для изучения и картографирования мелководий (на примере Северо-Восточного Каспия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1974. № 1. С. 78–88.
- Лабутина И.А., Сафьянов Г.А., Шарлай Т.Г. Исследование распространения взвесей в море по многозональным снимкам // ДАН СССР. 1976. Т. 230. № 2. С. 861–864.
- Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г. и др. Стационарные исследования эрозии почв при снеготаянии в центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1998. Т. 11. С. 57–76.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: изд-во МГУ, 1955. 353 с.
- Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат. 1949. 202 с.
- Медведева Р.А., Голосов В.Н., Ермолаев О.П. Пространственно-временная оценка овражной эрозии в зоне интенсивного земледелия Европейской части России // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 29–37.
- Попов И.В. Типы речных пойм и их связи с типами русловых процессов // Труды ГГИ. Л.: Гидрометеиздат. 1968. С. 39–55.
- Промахова Е.В. Изменчивость мутности речных вод в разные фазы водного режима. МГУ им. М.В. Ломоносова. Географический факультет, 2016. 228 с.
- Роднянская Э.Е. Методика крупномасштабного картографирования пойм больших рек // Материалы по физической географии. 1961. Вып. 1. С. 37–44.
- Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
- Сидорчук А.Ю. Баланс наносов в эрозионно-русловых системах // Геоморфология. 2015. Т. 1. С. 14–21.
- Сурков В.В. Возможности ландшафтно-индикационного метода оценки затопления пойм // Пойма и пойменные процессы. СПб.: Изд-во РГГМУ. 2006. С. 58–73.
- Сурков В.В. Динамика пойменных ландшафтов верхней и средней Оби. М.: Географический ф-т МГУ. 1999. 256 с.
- Сурков В.В., Завадский А.С., Чернов А.В. Пойма р. Москвы в нижнем течении, экологическое состояние, развитие в условиях интенсивного техногенного использования и оценка техногенной нарушенности её природных территориальных комплексов // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 21. М.: изд-во Моск. ун-та. 2019. С. 113–149.
- Успенский М.И., Харченко С.В., Цыпленков А.С. и др. Современная денудация малого приледникового водосбора озера Донгуз-Орун // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2025. Т. 80, № 4. С. 95–109.
- Харченко С.В. Новый алгоритм корегистрации цифровых моделей высот (item) // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55, № 4. С. 192–204.
- Харченко С.В. Способ корегистрации цифровых моделей высот для получения гидрологически корректного представления земной поверхности // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, № 3. С. 150–164.
- Харченко С.В., Голосов В.Н., Цыпленков А.С. и др. Темпы современной денудации малого водосбора в среднегорном поясе Большого Кавказа (на примере водосбора Гитче-Гижгит) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78, № 3. С. 38–51.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ. 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Рельеф пойм // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 1. М.: МГУ. 1970. С. 192–204.
- 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., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлёв П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В. Покровско-Якутский водный узел на р. Лене: современные деформации и управление русловыми процессами // Известия РАН. Сер. географическая. 2019. № 6. С. 83–96.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлёв П.П., Сахаров А.И. «Разбой» Рассолода на р. Лена: русловой режим и управление им с целью

- улучшения водного пути // Речной транспорт (XXI век). 2020. № 2. С. 25–31.
- Чалов Р.С., Чернов А.В. Геоморфологическая классификация пойм равнинных рек // Геоморфология. 1985. № 3. С. 3–11.
- Чалов С.Р., Ефимов В.А. Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2021. № 4. С. 91–103.
- Чалов С.Р. Речные наносы. М: ИНФРА М, 2024. 472 с. DOI: 10.12737/1984076.
- Чалов С.Р., Лошков О.А., Крастынь Е.А. Причины и закономерности быстрых изменений состава взвесей в малой городской реке Сетунь // Известия РАН. Серия Географическая. 2024. Т. 88. № 6. С. 893–901. DOI: 0.31857/S2587556624060043.
- Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние речных русел и пойм рек Северной Евразии. М.: ООО «Крона». 2009. 684 с.
- Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ. 1983. 198 с.
- Шамшурина Е.Н., Голосов В.Н., Попова А.Р. и др. Оценка изменений интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на малых водосборах Среднерусской возвышенности с начала земледельческого освоения // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2024. Т. 17, № 3. С. 60–71.
- Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды Геол. ин-та АН СССР. Сер. геологич. 1951. Вып. 135. № 55. 275 с.
- Эрозионно-русловые системы: монография / Под науч. ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с. (Научная мысль).
- Aleksyuk A.I., Belikov V.V. The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // Journal of Computational Physics. Aug. 2019. Vol. 390, P. 232–248.
- Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // Journal of Computational Physics. 2021.
- Ankorn P.D. Clarifying Turbidity – The Potential and Limitations of Turbidity as a Surrogate for Water-Quality Monitoring // Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference. 2003.
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Sidorchuk A.Yu. et al. A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia // Geomorphology. 2005. Vol. 65, No. 3–4. P. 173–193.
- Benselama O., Mazour M., Hasbaia M. et al. Analysis of the Suspended Sediment Yield at Different Time Scales in Mediterranean Watershed, Case of Wadi El Maleh (North-West of Algeria) // Journal of Mediterranean Earth Sciences. 2019. Vol. 11. P. 3–13.
- Bracken L.J., Turnbull L., Wainwright J. et al. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales // Earth Surface Processes and Landforms. 2015. DOI: 10.1002/esp.3635.
- Brierley G., Fryirs K., Jain V. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications // Area. 2006. DOI: 10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x.
- Burt T.P., Allison R.J. Sediment cascades: an integrated approach / eds. Burt T., Allison R. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 471 p. DOI: 10.1002/9780470682876.
- Carlson P. Mapping surface current flow in turbid nearshore waters of the northeast Pacific // Geol. Surv. Profess. 1976. No. 929. P. 328–329.
- Castillo C., Perez R., James M.R. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion // Soil Sci. Soc. Am. J. 2012. Vol. 76. P. 1319–1332. DOI: 10.2136/sssaj2011.0390.
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y. et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data // Geomorphology. 2010. Vol. 122. P. 167–177. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.06.011.
- Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // Catena, 2023. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107212
- Chalov S., Prokopeva K., Efimov V., Ivanov V., Kroffi B., Botavin D., Babinski Z., Zimov N., Pavlyukevich E., Habel M. Implications of Yedoma bank outcrop on the Arctic river sediment transport // Scientific reports. 2025. Vol. 15. P. 19320.
- Chanson H., Takeuchi M., Trevethan M. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary // Journal of Environmental Management. 2008. Vol. 88. No. 4. P. 1406–1416. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.07.009.
- Clayton K., Chorley R.J., Kennedy B.A. Physical Geography: A Systems Approach // The Geographical Journal. 1972. DOI: 10.2307/1795984.
- Davies-Colley R.J., Smith D.G. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review // Journal of the American Water Resources Association. 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x.

- Edwards W.M., Owens L. B. Large storm effects on total soil erosion // *J Soil & Water Cons.* 1991. No. 1. P. 75–78.
- Ferguson R.I. Channel form and channel changes (Britain) // *British rivers.* 1981.
- Frankl A., Poesen J., Haile M. et al. Quantifying long-term changes in gully networks and volumes in dryland environments: the case of Northern Ethiopia // *Geomorphology.* 2013. Vol. 201, P. 254–263.
DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.06.025.
- Fryirs K. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2013. Vol. 38. No. 1. P. 30–46. DOI: 10.1002/esp.3242.
- Fryirs K.A., Brierley G.J., Preston N.J. et al. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades // *Catena.* 2007. DOI: 10.1016/j.catena.2006.07.007.
- Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams // *Hydrological Processes.* 1995. Vol. 9. No. 1. P. 83–97. DOI: 10.1002/hyp.3360090108.
- Goloso V., Walling D.E. Using fallout radionuclides to investigate recent overbank sedimentation rates on river floodplain: an overview. *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea* // IAHS Publ. 2014. Vol. 367. IAHS Press, Wallingford, UK. P. 228–234.
DOI: 10.5194/piahs-367-228-2015.
- Gray J.R., Gartner J.W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring // *Water Resources Research.* 2009. Vol. 45. No. 4.
DOI: 10.1029/2008WR007063.
- Gupta S., Borrelli P., Panagos P. et al. An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity. *Sci Total Environ.* 2024. Vol. 908.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168249.
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R. A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 2017. No. 12(2), e0169748.
DOI: 10.1371/journal.pone.0169748
- Ivanova N.N., Krasnov S.F., Ivanov M.M. Experience of large-scale modeling of soil erosion over the entire period of agricultural use of a small catchment in Tula oblast // *Eurasian Soil Science.* 2025. Vol. 58, No. 8. P. 98. DOI: 10.1134/s1064229325600101.
- Joyce H.M., Hardy R.J., Warburton J., Large A.R.G. Sediment continuity through the upland sediment cascade: geomorphic response of an upland river to an extreme flood event // *Geomorphology.* 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.05.002.
- Krylenko I., Belikov V., Fingert E., Golovlyov P., Glotko A., Zavadskii A., Samokhin M., Borovkov S. Analysis of the Impact of Hydrotechnical Construction on the Amur River near Blagoveshchensk and Heihe Cities Using a Two-Dimensional Hydrodynamic Model // *Water resources.* 2018. Vol. 45. Suppl. 1. P. S112-S121.
- Krylenko I.N., Pavlyukevich (Kornilova) E.D., Zavadskii A.S., Golovlyov P.P., Fingert E.A., Borisova N.M., Belikov V.V. Modelling of potential impact of climate change on water regime and channel processes in the river Lena near city Yakutsk: possibilities and limitations. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY.* 2024. № 17(4). P.112–120.
- Lal R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 2004. 304(5677), 1623–1627.
DOI: 10.1126/science.1097396
- Larson W.E., Lindstrom M.J., Schumacher T.E. The role of severe storms in soil erosion: a problem needing consideration // *J. of Soil and Water Conservation.* 1997. Vol. 52(2). P. 90–95.
DOI: 10.1080/00224561.1997.12457139.
- Leslie C., Hancock G.J. Estimating the date corresponding to the horizon of the first detection of ¹³⁷Cs and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in sediment cores // *J. Environ. Radioact.* 2008. P. 483–490.
DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.08.016.
- Lewis J. Turbidity-Controlled Suspended Sediment Sampling for Runoff-Event Load Estimation // *Water Resources Research.* 1996. Vol. 32. No. 7. P. 2299–2310. DOI: 10.1029/96WR00991.
- Lindstrom M.J., Nelson W.W., Schumacher T.E. Quantifying tillage erosion rates due to mouldboard plowing // *Soil and Tillage Research.* 1992. No. 24. P. 243–255.
- Nduaguba D.C. Use of Landsat-1 standard data products for multispectral radiometric analysis of sedimentation in Kainji reservoir // *Int. Sci.-Technol. Conf. Space.* 1976. No. 16. P. 45–52.
- Panin A.V., Walling D.E., Goloso V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, central Russia // *Geomorphology.* 2001. Vol. 40, No. 3–4. P. 185–204.
- Pavanelli D., Bigi A. A new indirect method to estimate suspended sediment concentration in a river monitoring programme // *Biosystems Engineering.* 2005. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.08.004.
- Rompay A. Van, Verstraeten G., Oost K. et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed

approach // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2001. Vol. 26(11), P.1221–1236. DOI: 10.1002/esp.275.

Tsyplenkov A., Grachev A., Yermolaev O. et al. Impacts of post-soviet land-use transformation on sediment dynamics in the western Caucasus // *Journal of Hydrology*. 2025. Vol. 656. P. 132956

Tsyplenkov A., Uspenskii M., Kharchenko S. et al. Sediment yield assessment of a small ungauged montane catchment in the north Caucasus // *Geomorphology*. 2026. Vol. 496. P. 110156.

DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.110156.

Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L. et al. Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus mountains, Russia // *Catena*. 2021. Vol. 203. P. 105285.

Viers J., Dupre B., Gaillardet G. Chemical Composition of Suspended Sediments in World Rivers: New Insights from a New Database. *Science of the Total Environment*, 2009. Vol. 407, P. 853–868.

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.053

Zhang X.J. Evaluating and improving 137Cs technology for estimating soil erosion using soil loss data measured during 1954–2015 // *Earth-Science Rev.* 2023. Vol. 247. P. 104619.

DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104619/.

Zheng H., Miao C., Huntingford C., Tarolli P., Li D., Panagos P., Yue Y., Borrelli P., Van Oost K. The Impacts of Erosion on the Carbon Cycle. *Reviews of Geophysics*, 2025. No. 63(1). DOI: 10.1029/2023RG000829

Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D. et al. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary // *Geoderma*. 2023. Vol. 430. P. 116322.

Zimmermann A.E., Lapointe M. Sediment infiltration traps: Their use to monitor salmonid spawning habitat in headwater tributaries of the Cascapédia River, Québec // *Hydrological Processes*. 2005.

DOI: 10.1002/hyp.5879.

ОБ АВТОРАХ

Чалов Сергей Романович: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши, заведующий НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

srchalov@geogr.msu.ru

Голосов Валентин Николаевич: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доктор географических наук, в.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

gollossov@gmail.com

Завадский Александр Сергеевич: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, в.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

az200611@gambler.ru

Сурков Виталий Владимирович: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, с.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

vita.surkov@yandex.ru

Иннокентьев Александр Игоревич: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, инженер НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

sasha.inn2015@yandex.ru

Куракова Анна Александровна: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ.

a.a.kurakova@mail.ru

RESEARCH OF CATCHMENT EROSION-FLUVIAL SYSTEMS IN THE 21ST CENTURY: MODERN TECHNOLOGIES AND RESULTS

S.R. Chalov*, V.N. Golosov, A.S. Zavadsky, V.V. Surkov, A.I. Innokentyev, A.A. Kurakova

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

*srchalov@geogr.msu.ru

Abstract. The erosion-accumulative activity of water flows occurs on different spatial scales at different levels of catchment erosion-fluvial systems (CEFS). The article presents the main results of studies carried out by the scientific school of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University. These studies are devoted to the main components of CEFS — slopes and interfluves, river channels, as well as sediment runoff

connecting these spatially separated zones of the river basin. Each of the research areas is characterized in terms of the most relevant technologies – physical models and models of shared contribution, balance approaches applicable to interfluves; the method of hydrodynamic modeling of channel flows; sediment runoff monitoring technologies. Data are presented on the intensity of erosion-accumulative processes on the slopes of temperate watersheds and estimates of sediment delivery from watersheds of different sizes to the river network. This article examines methods for studying river floodplains, their formation and evolution, and mapping principles, as well as practical aspects of floodplain development and the mapping of economic activity within them. Using the largest river basins in the Russian Federation (the Ob, Yenisei, Lena, and Kolyma) as examples, it is shown that under modern hydroclimatic conditions, these areas are accumulation zones, where the sediment load transported outside the river basin is significantly lower than the sediment mass transported by erosion processes in the catchment area and river channels.

Keywords: sediment cascade, soil erosion, models of erosion, floodplain-channel complexes, hydrodynamic modeling, sediment runoff, hydrochemistry of river sediments

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out according to the State Task of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University 1.13 «Erosion-channel systems: hydrological regime, natural and anthropogenic transformations, and forecast of hazardous processes»

REFERENCES

- Alabyan A.M., Belikov V.V., Krylenko I.N., Fingert E.A., Fedorova T.A. Retrospective modeling of extreme flooding on the Oka River in the city of Ryazan and impact assessment on urban and transport infrastructure // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. No. S1. P. 1–10. (in Russ.).
- Alekseevsky N.I. Formation and Movement of River Sediments. Moscow: izd-vo MGU, 1998. 202 p. (in Russ.).
- Alekseevsky N.I., Belozerova E.V., Kasimov N.S., et al. Spatial Variability of Suspended Sediment Discharge Characteristics in the Selenga Basin During Rainfall-Induced Floods // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografija*. 2013. Vol. 3. No. 3. P. 60–65. (in Russ.).
- Alekseuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. Riemann problem solver for shallow water equations with a discontinuous bottom // *Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2020660617*, 2020. (in Russ.).
- Aleksyuk A.I., Belikov V.V. The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // *Journal of Computational Physics*. Aug. 2019. Vol. 390, P. 232–248.
- Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // *Journal of Computational Physics*. 2021.
- Ankorn P.D. Clarifying Turbidity – The Potential and Limitations of Turbidity as a Surrogate for Water-Quality Monitoring // *Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference*. 2003.
- Annenskaya G.N. Application of the landscape method in the study of floodplains of large rivers // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*. 1963. No. 4. P. 32–37. (in Russ.).
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., et al. Surface runoff and infiltration of meltwater into the soil on arable land in the forest-steppe and steppe zones of the East European Plain // *Pochvovedenie*. 2018. No. 1. P. 62–69. (in Russ.).
- Baryshnikov N.B., Popov I.V. Dynamics of Channel Flows and Channel Processes. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 456 p. (in Russ.).
- Belikov V.V., Aleksyuk A.I. Shallow Water Models in River Hydrodynamics Problems. Moscow: RAS, 2020. 346 p. (in Russ.).
- Belikov V.V., Vasilyeva E.S., Malyugin N.R., Golovlev P.P., Zavadskiy A.S. Numerical modeling of the operation of coastal protection structures on the Nyukzha River section // *Hydrotechnical construction*. 2025. No. 12. P. 47–55. (in Russ.).
- Belozerova E.V., Chalov S.R. Determination of river water turbidity using optical methods // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2013. Vol. 6. No. 5. P. 39–45. (in Russ.).
- Belyaev V.R., Golosov V.N., Sidorchuk A.Yu. et al. A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia // *Geomorphology*. 2005. Vol. 65, No. 3–4. P. 173–193.
- Benselama O., Mazour M., Hasbaia M. et al. Analysis of the Suspended Sediment Yield at Different Time Scales in Mediterranean Watershed, Case of Wadi El Maleh (North-West of Algeria) // *Journal of Mediterranean Earth Sciences*. 2019. Vol. 11. P. 3–13.
- Berkovich K.M., Zlotina L.V., Ryazanov P.N. An evolutionary series of island and channel-side natural territorial complexes in the floodplain of the upper Ob // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 1983. No. 2. P. 82–88. (in Russ.).

- Bezukhov D.A., Golosov V.N., Panin A.V. Estimation of the sediment delivery coefficient for small watersheds in the forest-steppe and steppe regions of the East European Plain // *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja*. 2019. No. 4. P. 73–84. DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84. (in Russ.).
- Bracken L.J., Turnbull L., Wainwright J. et al. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2015. DOI: 10.1002/esp.3635.
- Brierley G., Fryirs K., Jain V. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications // *Area*. 2006. DOI: 10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x.
- Burt T.P., Allison R.J. Sediment cascades: an integrated approach / eds. Burt T., Allison R. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 471 p. DOI: 10.1002/9780470682876.
- Carlson P. Mapping surface current flow in turbid nearshore waters of the northeast Pacific // *Geol. Surv. Profess.* 1976. No. 929. P. 328–329.
- Castillo C., Perez R., James M.R. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2012. Vol. 76. P. 1319–1332. DOI: 10.2136/sssaj2011.0390.
- Catchment Erosion-Fluvial Systems: Monograph / Edited by R.S. Chalov, A.Yu. Sidorchuk, V.N. Golosov. Moscow: INFRA-M, 2017. 702 p. (Nauchnaja mysl') (in Russ.).
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y. et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data // *Geomorphology*. 2010. Vol. 122. P. 167–177. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.06.011.
- Chalov R.S. Channel Geomorphology: Theory, Geography, Practice. Vol. 1. Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms of Manifestation, and Conditions of Formation of River Channels. Moscow: Izdatel'stvo LKI. 2008. 608 p. (in Russ.).
- Chalov R.S. Floodplain Relief // *Soil Erosion and Channel Processes*. Issue 1. Moscow: Izdatel'stvo MGU. 1970. P. 192–204. (in Russ.).
- Chalov R.S. Geographical Studies of Channel Processes. Moscow: Izdatel'stvo MGU. 1979. 232 p. (in Russ.).
- Chalov R.S., Chernov A.V. Geomorphological Classification of Floodplains of Lowland Rivers // *Geomorfologija*. 1985. No. 3. P. 3–11. (in Russ.).
- Chalov R.S., Zavadsky A.S., Botavin D.V., Golovlev P.P., Morozova E.A., Surkov V.V. Pokrovsk-Yakutsky Water Node on the Lena River: Current Deformations and Management of Channel Processes // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2019. No. 6. P. 83–96. (in Russ.).
- Chalov R.S., Zavadsky A.S., Botavin D.V., Golovlev P.P., Sakharov A.I. Rassoloda branching on the Lena River: Channel Regime and Its Management to Improve the Waterway // *River Transport (XXI Century)*. 2020. No. 2. P. 25–31. (in Russ.).
- Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // *Catena*, 2023. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107212
- Chalov S.R. River Sediments. Moscow: INFRA M, 2024. 472 p. DOI: 10.12737/1984076. (in Russ.).
- Chalov S.R., Loshkov O.A., Krastyn E.A. Drivers and Features of Rapid Suspended Sediment Composition Changes in the Small Urban River Setun // *Izvestija RAN. Serija Geograficheskaja*. 2024. Vol. 88. No. 6. P. 893–901. DOI: 10.31857/S2587556624060043. (in Russ.).
- Chalov S., Prokopeva K., Efimov V., Ivanov V., Kroff B., Botavin D., Babinski Z., Zimov N., Pavlyukevich E., Habel M. Implications of Yedomo bank outcrop on the Arctic river sediment transport // *Scientific reports*. 2025. Vol. 15. P. 19320.
- Chalov S.R., Efimov V.A. Mechanical composition of suspended sediments: classifications, characteristics, spatial variability // *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*. 2021. No. 4. P. 91–103. (In Russ.).
- Chanson H., Takeuchi M., Trevethan M. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary // *Journal of Environmental Management*. 2008. Vol. 88. No. 4. P. 1406–1416. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.07.009.
- Chernov A.V. Geography and Geoecological Condition of River Channels and Floodplains in Northern Eurasia. Moscow: OOO «Krona». 2009. 684 p. (in Russ.).
- Chernov A.V. Geomorphology of Lowland River Floodplains. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1983. 198 p. (in Russ.).
- Clayton K., Chorley R.J., Kennedy B.A. Physical Geography: A Systems Approach // *The Geographical Journal*. 1972. DOI: 10.2307/1795984.
- Davies-Colley R.J., Smith D.G. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review // *Journal of the American Water Resources Association*. 2001. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x.
- Dobrovolsky G.V., Balabko P.N., Stasyuk N.V., et al. Alluvial Soils of River Floodplains and Deltas and Their Zonal Differences // *Aridnye jekosistemy*. 2011. Vol. 17. No. 3(48). P. 5–13. (in Russ.).
- Dymnikov V.P., Zalesny V.B., Glazunov A.V., Stepanenko V.M. Models of climate, geophysical

boundary layers and the active layer of land: in memory of V.N. Lykosov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 2022. Vol. 58, No. 4. P. 375–383.

DOI: 10.31857/S0002351522040046 (in Russ.)

Edwards W.M., Owens L.B. Large storm effects on total soil erosion // *J Soil & Water Cons.* 1991. No. 1. P. 75–78.

Efimov V.A., Chalov S.R., Magritsky D.V., Efimova L.E. Assessment of water runoff, sediment concentrations and chemical substances at the mouth of the Kolyma River based on the results of field studies in 2019 // *THE FOURTH VINOGRADOV READINGS. HYDROLOGY FROM KNOWLEDGE TO WORLD-VIEW* Collection of Papers of the International Scientific Conference in Memory of the Outstanding Russian Scientist Yuri Borisovich Vinogradov. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House, 2019. P. 1064–1069. (in Russ.)

Ferguson R.I. Channel form and channel changes (Britain) // *British rivers*. 1981.

Frankl A., Poesen J., Haile M. et al. Quantifying long-term changes in gully networks and volumes in dryland environments: the case of Northern Ethiopia // *Geomorphology*. 2013. Vol. 201, P. 254–263.

DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.06.025.

Fryirs K. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2013. Vol. 38. No. 1. P. 30–46. DOI: 10.1002/esp.3242.

Fryirs K.A., Brierley G.J., Preston N.J. et al. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades // *Catena*. 2007. DOI: 10.1016/j.catena.2006.07.007.

Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams // *Hydrological Processes*. 1995. Vol. 9. No. 1. P. 83–97. DOI: 10.1002/hyp.3360090108.

Girlo E.M., Chalov S.R., Kharchenko S.V. Assessment of suspended sediment inflow into rivers using the method of tracing sediment sources to address urbanized watershed management issues // *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2025. No. 6. P. 26–51.

DOI: 35567/1999-4508-2025-6-26-51. (in Russ.)

Golosov V., Walling D.E. Using fallout radionuclides to investigate recent overbank sedimentation rates on river floodplain: an overview. *Sediment Dynamics from the Summit to the Sea* // *IAHS Publ.* 2014. Vol. 367. IAHS Press, Wallingford, UK. P. 228–234.

DOI: 10.5194/piahs-367-228-2015.

Golosov V.N. Erosional and Accumulative Processes in River Basins of Developed Plains. 2006. 296 p. (in Russ.)

Golosov V.N. Quantitative assessment of deposits' redistribution in the upper links of fluvial network: achievements and problems // *Geomorfologija*. 2008. No. 3. P. 29–37. (in Russ.)

Golosov V.N., Kumani M.V., Ivanova N.N., et al. Siltation of a small reservoir under climatic changes and urbanization of its water catchment basin (the Popovsky pond, Kursk) // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija*. 2020. No. 6. P. 51–62. (in Russ.)

Golosov V.N., Shamshurina E.N., Kolos G.I., et al. Spatiotemporal Changes in the Erosion and Deposition Processes in a Small Catchment in the North of the Central Russian Upland // *Pochvovedenie*. 2024. No. 5. P. 738–754. (in Russ.)

Golosov V.N., Zhidkin A.P., Petelko A.I., et al. Field Verification of Erosion Models Based on the Studies of a Small Catchment in the Vorobzha River Basin (Kursk oblast, Russia) // *Pochvovedenie*. 2022. No. 10. P. 1321–1338. (in Russ.)

Gordeev V.V. The river-sea system and its role in ocean geochemistry: Abstract of a Doctor of Geological and Mineral Sciences dissertation: 25.00.28. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2009. 36 p. (in Russ.)

Gray J.R., Gartner J.W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring // *Water Resources Research*. 2009. Vol. 45. No. 4.

DOI: 10.1029/2008WR007063.

Grin A.M. Experience in the stationary study of runoff and erosion processes. *Modern exogenic processes of relief formation*. Moscow: Nauka, 1970. P. 89–95. (in Russ.)

Gupta S., Borrelli P., Panagos P. et al. An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity. *Sci Total Environ*. 2024. Vol. 908.

DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168249.

Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G. B. M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M. N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M. A., Vargas R., MacMillan R. A., Batjes N. H., Leenaars J. G. B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 2017. No. 12(2), e0169748. DOI: 10.1371/journal.pone.0169748

Ivanov M.M., Ivanova N.N., Golosov V.N., et al. Assessment of Changes in Chernobyl Contamination and Erosion Rates for Arable Soils Using Resampling Method // *Pochvovedenie*. 2024. No. 9. P. 1251–1262. (in Russ.)

Ivanova N.N., Krasnov S.F., Ivanov M.M. Experience of large-scale modeling of soil erosion over the entire period of agricultural use of a small catchment in Tula oblast // *Eurasian Soil Science*. 2025. Vol. 58, No. 8. P. 98. DOI: 10.1134/s1064229325600101.

- Joyce H.M., Hardy R.J., Warburton J., Large A.R.G. Sediment continuity through the upland sediment cascade: geomorphic response of an upland river to an extreme flood event // *Geomorphology*. 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.05.002.
- Kedich A.I., Golosov V.N., Kharchenko S.V. Exogenous processes in proglacial zones of mountains: quantitative estimates and their accuracy // *Uchjonye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya Estestvennye nauki*. 2022. Vol. 164, No. 1. P. 109–134. (in Russ.).
- Kharchenko S.V. The method for co-registration of digital terrain data to obtain hydrologically correct model of the earth's surface // *Geomorfologija i Paleografija*. 2023. Vol. 54, No. 3. P. 150–164. (in Russ.).
- Kharchenko S.V. A new algorithm for coregistration of digital elevation models (ILEM) // *Geomorfologija i Paleografija*. 2024. Vol. 55, No. 4. P. 192–204. (in Russ.).
- Kharchenko S.V., Golosov V.N., Tsypelenkov A.S., et al. Rates of modern denudation of a small catchment in the middle mountain belt of the Greater Caucasus (case study of the Gitche-Gizhgiz catchment) // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2023. Vol. 78, No. 3. P. 38–51. (in Russ.).
- Kondratyev N.E., Lyapin A.N., Popov I.V., et al. *Channel Process*. L.: Gidrometeoizdat. 1959. 372 p. (in Russ.).
- Kondratyev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Fundamentals of the Hydromorphological Theory of the Channel Process*. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 272 p. (in Russ.).
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Golovlev P.P., Sazonov A.A., Nikitskiy A.N. Verification of a Two-Dimensional Hydrodynamic Model of the Lena River near Yakutsk Based on Multi-temporal Satellite Imagery Data // *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2018. Vol. 15, No. 5. P. 169–178. (in Russ.).
- Kravtsova V.I., Antonova S.Yu. Application of multi-zonal surveying for the study and mapping of shallow waters (using the example of the northeastern Caspian Sea) // *Proceedings of Universities. Geology and Exploration*. 1974. No. 1. P. 78–88. (in Russ.).
- Krylenko I., Belikov V., Fingert E., Golovlyov P., Glotko A., Zavadskii A., Samokhin M., Borovkov S. Analysis of the Impact of Hydrotechnical Construction on the Amur River near Blagoveshchensk and Heihe Cities Using a Two-Dimensional Hydrodynamic Model // *Water resources*. 2018. Vol. 45, Suppl. 1. P. S112–S121.
- Krylenko I.N., Pavlyukevich (Kornilova) E.D., Zavadskii A.S., Golovlyov P.P., Fingert E.A., Borisova N.M., Belikov V.V. Modelling of potential impact of climate change on water regime and channel processes in the river Lena near city Yakutsk: possibilities and limitations. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. 2024. № 17(4). P.112–120.
- Lal R. *Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security*. Science, 2004. 304(5677), 1623–1627.
DOI: 10.1126/science.1097396
- Labutina I.A., Safyanov G.A., Sharlay T.G. Study of the Distribution of Suspended Matter in the Sea Using Multizonal Images // *DAN SSSR*. 1976. Vol. 230. No. 2. P. 861–864. (in Russ.).
- Larson W.E., Lindstrom M.J., Schumacher T.E. The role of severe storms in soil erosion: a problem needing consideration // *J. of Soil and Water Conservation*. 1997. Vol. 52(2). P. 90–95.
DOI: 10.1080/00224561.1997.12457139.
- Leslie C., Hancock G.J. Estimating the date corresponding to the horizon of the first detection of ¹³⁷Cs and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in sediment cores // *J. Environ. Radioact.* 2008. P. 483–490.
DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.08.016.
- Lewis J. Turbidity-Controlled Suspended Sediment Sampling for Runoff-Event Load Estimation // *Water Resources Research*. 1996. Vol. 32, No. 7. P. 2299–2310. DOI: 10.1029/96WR00991.
- Lindstrom M.J., Nelson W.W., Schumacher T.E. Quantifying tillage erosion rates due to mouldboard plowing // *Soil and Tillage Research*. 1992. No. 24. P. 243–255.
- Litvin L.F., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., et al. Long-term studies of soil erosion during snowmelt in the central Non-Chernozem region // *Jerozija pochv i ruslovyje processy*. Moscow: Moscow University Press. 1998. Vol. 11. P. 57–76. (in Russ.).
- Makkaveev N.I. *River Channels and Erosion in Their Basins*. Moscow: izd-vo MGU, 1955. 353 p. (in Russ.).
- Makkaveev N.I. *The River Channel and Erosion in Its Basin*. Moscow: Izd-vo AN SSSR. 1955. 347 p. (in Russ.).
- Medvedeva R.A., Golosov V.N., Ermolaev O.P. Spatio-temporal assessment of gully erosion in the zone of intensive agriculture in the European part of Russia // *Geografija i prirodnye resursy*. 2018. No. 3. P. 29–37. (in Russ.).
- Nduaguba D.C. Use of Landsat-1 standard data products for multispectral radiometric analysis of sedimentation in Kainji reservoir // *Int. Sci.-Technol. Conf. Space*. 1976. No. 16. P. 45–52.
- Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, central Russia // *Geomorphology*. 2001. Vol. 40, No. 3–4. P. 185–204.

- Pavanelli D., Bigi A. A new indirect method to estimate suspended sediment concentration in a river monitoring programme // *Biosystems Engineering*. 2005. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.08.004.
- Popov I.V. Types of river floodplains and their relationship to types of channel processes // *Proceedings of the State Hydrological Institute. L.: Gidrometeoizdat*. 1968. P. 39–55. (in Russ.).
- Promakhova E.V. Variability of river water turbidity during different phases of the hydrological regime. MGU im. M.V. Lomonosova. *Geograficheskij fakul'tet*, 2016. 228 p. (in Russ.).
- Rodnyanskaya E.E. Methodology for large-scale mapping of floodplains of major rivers // *Materialy po fizicheskoy geografii*. 1961. Issue 1. P. 37–44. (in Russ.).
- Rompay A. Van, Verstraeten G., Oost K. et al. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surf. Processes Landforms*. 2001. Vol. 26(11), P. 1221–1236. DOI: 10.1002/esp.275.
- Savenko V.S. Chemical composition of suspended sediments of the world's rivers. Moscow: GEOS, 2006. 175 p. (In Russ.).
- Shamshurina E.N., Golosov V.N., Popova A.R., et al. Assessment of Changes in the Intensity of Erosion–Accumulative Processes in Small Catchment Areas of the Central Russian Upland since the Beginning of Agricultural Development // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 17: Pochvovedenie*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 60–71. (in Russ.).
- Shantser E.V. Alluvium of lowland rivers in the temperate zone and its significance for understanding the patterns of structure and formation of alluvial suites // *Trudy Geologicheskogo instituta AN SSSR. Serija geologicheskaja*. 1951. Issue 135. No. 55. 275 p. (in Russ.).
- Sidorchuk A.Yu. Sediment balance in the erosion-deposition systems // *Geomorfologija*. 2015. Vol. 1. P. 14–21. (in Russ.).
- Surkov V.V. Dynamics of floodplain landscapes in the upper and middle Ob River. Moscow: *Geograficheskij fakul'tet MGU*. 1999. 256 p. (in Russ.).
- Surkov V.V. The Potential of the Landscape-Indicator Method for Assessing Floodplain Inundation // *Floodplains and Floodplain Processes*. St. Petersburg: Izd-vo RGGMU. 2006. P. 58–73. (in Russ.).
- Surkov V.V., Zavadsky A.S., Chernov A.V. The floodplain of the Moscow River in its lower course, ecological condition, development under conditions of intensive anthropogenic use, and assessment of anthropogenic disturbance of its natural territorial complexes // *Jerozija pochv i ruslovyje processy*, Issue 21. Moscow: Izdatel'stvo MGU. 2019. P. 113–149. (in Russ.).
- Tsyplenkov A., Grachev A., Yermolaev O. et al. Impacts of post-soviet land-use transformation on sediment dynamics in the western Caucasus // *Journal of Hydrology*. 2025. Vol. 656. P. 132956
- Tsyplenkov A., Uspenskii M., Kharchenko S. et al. Sediment yield assessment of a small ungauged montane catchment in the north Caucasus // *Geomorphology*. 2026. Vol. 496. P. 110156. DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.110156.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L. et al. Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus mountains, Russia // *Catena*. 2021. Vol. 203. P. 105285.
- Uspensky M.I., Kharchenko S.V., Tsyplenkov A.S., et al. Present-day denudation of a small alpine catchment of the Donguz-Orun lake // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija*. 2025. Vol. 80, No. 4. P. 95–109. (in Russ.).
- Viers J., Dupre B., Gaillardet G. Chemical Composition of Suspended Sediments in World Rivers: New Insights from a New Database. *Science of the Total Environment*, 2009. Vol. 407, P. 853–868. DOI: /10.1016/j.scitotenv.2008.09.053
- Zavadsky A.S., Surkov V.V., Chernov A.V., et al. Transformation of floodplain landscapes under the influence of natural and anthropogenic environmental changes (using the example of the Zakharkovskaya floodplain of the Moscow River) // *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Serija Biologija. Nauki o zemle*. 2021. Vol. 31. No. 2. P. 166–177. (in Russ.).
- Zavadsky A.S., Surkov V.V., Chernov A.V., et al. Natural territorial complexes of floodplain in the Moskva River lower reaches under intensive economic development // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija*. 2020. No. 3. P. 3–13. (in Russ.).
- Zavadsky A.S., Surkov V.V., Samokhin M.A. Changes in the flooding regime of the Lena river left bank floodplain near Yakutsk // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija*. 2025. No. 4. P. 110–124. (in Russ.).
- Zavadsky A.S., Fingert E.A., Botavin D.V., Golovlev P.P. Modern Approaches to Substantiating General Schemes for the Radical Improvement of Shipping Conditions (using the example of a complex branched section of the Lena River) // *Hydraulic Structures of Waterways: Coll. of scientific papers: Issue 4*. St. Petersburg: Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2019. P. 148–160. (in Russ.).
- Zhang X.J. Evaluating and improving ¹³⁷Cs technology for estimating soil erosion using soil loss data measured during 1954–2015 // *Earth-Science Rev*. 2023. Vol. 247. P. 104619. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104619/.
- Zheng H., Miao C., Huntingford C., Tarolli P., Li D., Panagos P., Yue Y., Borrelli P., Van Oost K. The Impacts

ABOUT THE AUTHORS

of Erosion on the Carbon Cycle. *Reviews of Geophysics*, 2025. No. 63(1). DOI: 10.1029/2023RG000829

Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D. et al. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary // *Geoderma*. 2023. Vol. 430. P. 116322.

Zhuchkova V.K. *Organization and Methods of Comprehensive Physical-Geographical Research*. Moscow: Moscow State University. 1977. 186 p. (in Russ.).

Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. *Methods of Comprehensive Physical-Geographical Research*. Moscow: Centr «Akademija». 2004. 354 p. (in Russ.).

Zimmermann A.E., Lapointe M. Sediment infiltration traps: Their use to monitor salmonid spawning habitat in headwater tributaries of the Cascapédia River, Québec // *Hydrological Processes*. 2005.

DOI: 10.1002/hyp.5879.

Zlotina L.V. Formation and development of floodplain geocomplexes in areas with varying channel stability (using the example of the upper and middle Ob) // *Dep. VINITI*. 1989. No. 4679-89. 10 p. (in Russ.).

Chalov Sergey Romanovich. Lomonosov Moscow State University. Doctor of geographical sciences. srchalov@geogr.msu.ru

Golosov Valentin Nikolaevich. Lomonosov Moscow State University. Doctor of geographical sciences. golossov@gmail.com

Zavadsky Alexander Sergeevich. Lomonosov Moscow State University. Candidate of geographical sciences. az200611@rambler.ru

Surkov Vitaly Vladimirovich. Lomonosov Moscow State University. Candidate of geographical sciences. vita.surkov@yandex.ru

Innokentyev Alexander Igorevich. Lomonosov Moscow State University. sasha.inn2015@yandex.ru

Kurakova Anna Alexandrovna. Lomonosov Moscow State University. Candidate of geographical sciences. a.a.kurakova@mail.ru

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА Р. ИРТЫШ В РАЙОНЕ Г. СЕМЕЙ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.А. Щеглов, В.М. Католиков

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

Obyvanky45@gmail.com

Поступила в редакцию 08.12.2025

После доработки 03.03.2026

Принята к публикации 11.03.2026

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования, направленного на улучшение судоходных условий на лимитирующем участке р. Иртыш в районе г. Семей (Верхний и Нижний Жанасемейские перекаты, 2900–2904 км судового хода). Исследование базируется на методологии гибридного (совмещенного) гидравлического моделирования, интегрирующего численные расчеты в программном комплексе HEC-RAS и эксперименты на пространственной физической модели.

Цель работы — сравнительный анализ эффективности и обоснование параметров двух вариантов регулирующих гидротехнических сооружений (продольной и поперечной запруд) для обеспечения гарантированных глубин в меженный период. Проведена верификация численной модели и тарировка физической модели по данным натурных наблюдений. Установлено, что оба варианта обеспечивают значительное повышение уровня воды (до 92 см для продольной и до 62 см для поперечной запруды) при межennem расходе 625 м³/с. Выявлен и количественно оценен негативный эффект в виде косоструйного течения (до 1.5 м/с) для варианта с продольной запрудой, что потребовало коррекции ее положения. На полуразмываемой физической модели исследованы морфодинамические процессы в паводковый период (расход 3500 м³/с) и выявлены зоны потенциальных размывов, угрожающих устойчивости сооружений. Для каждого варианта разработаны и апробированы на модели инженерные мероприятия по защите от размывов (укрепление гибкими железобетонными матами и валунной отсыпкой). Доказана взаимодополняемость и высокая эффективность комбинирования численных и физических методов моделирования для получения достоверных и комплексных инженерных решений.

Ключевые слова: река Иртыш, судоходные условия, перекаты, численное моделирование, HEC-RAS, физическое моделирование, гидротехнические сооружения, деформации русла, размыв

DOI: [10.71367/3034-4638-2026-1-1-45-57](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2026-1-1-45-57)

ВВЕДЕНИЕ

Объектом научного исследования является затруднительный для судоходства участок р. Иртыш на 2900–2904 км по судовому ходу в районе г. Семей на территории Республики Казахстан, в пределах которого расположены Нижний и Верхний Жанасемейские перекаты.

Основной задачей исследования была разработка научных рекомендаций по обеспечению судоходных условий на перекатах Нижний Жанасемейский и Верхний Жанасемейский на р. Иртыш путем увеличения гарантированных глубин на перекатах без осуществления дноуглубительных работ в судоходных прорезях.

Методической основой решения данной проблемы было использование методики гибридного моделирования — сочетания численного моделирования гидравлических характеристик речного потока на исследуемом участке р. Иртыш на основе программного комплекса HEC-RAS с физическим моделированием на жесткой (недеформируемой) и полуразмываемой гидравлических моделях.

Данный метод ранее использовался лишь в работе по прогнозированию русловых процессов на р. Ганг. Для исследования использовалась физическая модель в совокупности с 3D численными моделями (Исследование условий..., 2023).

Необходимость комбинированного использования математического и физического моделирования

обусловлена тем обстоятельством, что в структуры современных математических моделей заложена бесструктурная (безгрядовая) форма движения донных наносов, в то время как в натуральных условиях движение донных наносов осуществляется в грядовых формах, что и определяет режим деформаций дна на границах инженерных сооружений. Расчеты на математических моделях позволяют достаточно достоверно установить гидравлические характеристики речного потока (уклоны, уровни, скорости и структуру течений), необходимые для тарировки физической модели, и при различных вариантах компоновки инженерных сооружений. В то же время методически корректно созданные физические модели позволяют достоверно воспроизвести грядовую форму движения донных наносов и оценить возможные деформации речного дна на границах инженерных сооружений при грядовой форме их движения.

Основным результатом работы являются рекомендации по увеличению гарантированных глубин на перекатах путем возведения или продольной (меженной) запруды в районе Старого и Железнодорожного мостов между о-вами Бейбитшилик и Кругленький, или поперечной запруды с различной высотой в гребне в несудоходном рукаве.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА Р. ИРТЫШ В РАЙОНЕ Г. СЕМЕЙ

Река Иртыш — одна из крупнейших рек мира (протяженность 4248 км) и самая крупная в Республике Казахстан. Состояние природной среды и обеспеченность водными ресурсами в ее бассейне затрагивают государственные и экономические интересы трех сопредельных стран — Китайской Народной Республики, Республики Казахстан и Российской Федерации, имеющих свои собственные интересы в использовании стока Иртыша.

Согласно навигационно-гидрографическому описанию, участок р. Иртыш от Шульбинской ГЭС до с. Майтубек имеет протяженность по фарватеру 320.5 км. Протекая через степную зону Западно-Сибирской низменности, река не принимает ни одного значительного притока (Лощманская карта..., 2024). В верхней части участка ширина долины 2.5–3.0 км, местами долина сужается до 1.0 км.

В районе г. Семей долина реки расширяется и достигает 7 км. Здесь она имеет симметричный поперечный профиль, пойменную и две надпойменные террасы. Ширина долины достигает 7 км, и лишь в районе населенного пункта Долонь и Известковских перекатов сужается до 2.5 км.

Русло реки в верхней части участка до г. Семей слабоизвилистое, с коэффициентом извилистости

1.25, развивается по типу русловой многорукавности островного вида, ложе русла здесь сложено из гравийно-галечных грунтов, с выходами скальных пород. Встречается большое количество валунов.

На участке от г. Семей до с. Белокаменка пойма реки низкая, поросшая лиственными породами деревьев и кустарником. Русло сложено гравийно-песчаными грунтами. Для него характерна большая извилистость, развитая сеть протоков и отмирающих рукавов.

Грунты берегов представлены в основном супесью, легко размываемой в период стояния высоких уровней воды. Судовой ход здесь очень извилистый, узкий, с малыми габаритами и радиусами поворотов.

На рассматриваемом участке р. Иртыш наблюдаются как сезонные, так и суточные колебания уровней воды, зависящие от режима работы Шульбинской ГЭС (Лощманская карта..., 2024). Амплитуда суточных колебаний в меженьный период в г. Семей составляет 10–15 см, в с. Жетижар (Семярка) 5–7 см. Весенний подъем воды связан с ирригационным попуском через Шульбинскую ГЭС, который осуществляется для обводнения поймы. Максимальный расход составляет 3500 м³/с, при этом подъем уровня воды составляет 2.5–3.0 м.

Значения скорости течения воды на судовом ходу в границах Семейского участка, затруднительного для судоходства, изменяются:

– при низких уровнях воды 7.4–7.7 км/час (2.06–2.14 м/с);

– при высоких уровнях воды 11.2–12.7 км/час (3.11–3.53 м/с).

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РУСЛЕ Р. ИРТЫШ НА ИССЛЕДУЕМОМ УЧАСТКЕ

2.1. Численная модель, использованная в исследовании

Основным программным комплексом, использованным для численного моделирования потока на исследуемом участке р. Иртыш, был программный комплекс HEC-RAS.

Название программного комплекса HEC-RAS расшифровывается как The Hydrologic Engineering Center's (HEC) River Analysis System (RAS). Он является свободно распространяемой версией модели, разработанной Гидрологическим инженеринговым центром Института водных ресурсов Инженерного корпуса армии США: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.

HEC-RAS представляет собой интегрированную систему программного обеспечения, предназначенную для интерактивного использования в многозадачной многопользовательской сетевой среде. Система состоит из графического интерфейса пользователя (GUI), отдельных компонентов гидравлического анализа, возможностей хранения и управления данными, графики и средств создания отчетов. Программный комплекс позволяет выполнять следующие расчеты речной гидравлики:

- одномерные устойчивые течения;
- одномерные (1D) и двумерные (2D) нестационарные течения в реках.

Система уравнений в HEC-RAS решается методом конечных разностей с использованием для аппроксимации производных неявной четырехточечной схемы Прейсмана.

2.2. Методика физического моделирования на пространственных моделях

Экспериментальные исследования на пространственных гидравлических моделях были выполнены в Руслевой гидравлической лаборатории ГГИ, имеющей большой многолетний опыт физического гидравлического моделирования речных потоков и механизма движения руслоформирующих наносов.

Моделирование исследуемого участка р. Иртыш на жесткой пространственной гидравлической модели осуществлялось на основе методики, принятой в мировой лабораторной практике и основанной на равенстве значений числа Фруда в натуральных условиях и на модели.

Моделирование на полуразмываемой модели производилось по методике, разработанной в Руслевой гидравлической лаборатории (Клавен, Копалиани, 2011), дополненной методикой, учитывающей дискретный характер движения донных наносов и особые закономерности взаимодействия речного потока и подвижного дна на каждом структурном уровне форм движения донных наносов (Католиков, 2023). Суть этого методического дополнения заключается в замене при моделировании геометрических параметров отдельных зерен подвижных донных наносов, перемещающихся в бесструктурной форме, на параметры дискретных грядовых структур (высоту и длину гряд, относительную скорость их движения), представляющих собой иной структурный уровень формы движения руслоформирующих наносов.

В работе (Католиков, 2023) было показано, что методологической основой такой замены является один из постулатов гидроморфологической теории руслового процесса, утверждающий, что транспорт наносов имеет дискретный характер и осуществля-

ется в виде дискретных целостных морфологических образований на четырех структурных уровнях: на уровне частиц и на уровнях микро-, мезо- и макроформ. При этом на каждом уровне движение морфологических элементов в русле и их взаимодействие с дискретными структурами водного потока осуществляются по законам, соответствующим только этому уровню, и эти законы не могут быть перенесены с одного структурного уровня на другой (Кондратьев, Попов, Снисченко, 1982).

Следовательно, для достижения подобия механизма движения донных наносов и их взаимодействия с водным потоком в натуральных и модельных условиях необходимо обеспечить подобие формы структурированного грядового движения донных наносов, т. е. подобие гряд. При этом следует обратить внимание на то, что ни в эмпирические формулы высоты и длины гряд, ни в разработанные в рамках гидроморфологической теории руслового процесса формулы расчета скорости их движения величина диаметра наносов не входит. Это позволяет при физическом моделировании грядового движения донных наносов и деформаций речного русла равнинных рек игнорировать требование уменьшения диаметра модельных наносов в масштабе модели и использовать модельные наносы с диаметрами, превышающими значение 0.1 мм, т. е. наносы, для которых силы молекулярного сцепления не являются доминирующими.

Таким образом, при моделировании механизма грядового движения донных наносов в равнинных реках требуется обеспечение только подобия отношения средней на вертикали скорости потока к некоторой критической неразмывающей скорости (v/v_0). Поскольку этот критерий входит во многие эмпирические формулы расчета высоты и скорости движения гряд, то равенство этого критерия в натуральных условиях и на модели обеспечивает подобие грядовой формы движения донных наносов в натуре и на модели без учета диаметра модельных наносов.

Подобие геометрических границ русла, уклона дна и грядовой формы транспорта наносов при условии $Re_{\text{мод}} > Re_{\text{кр}}$ приведет к равенству значений коэффициентов Шези и коэффициентов гидравлического сопротивления русла на модели и в натуре.

Исходя из всех указанных выше условий и учитывая, что при решении стоящих задач достаточно будет осуществлять моделирование речного потока на уровне осредненных в точке гидравлических характеристик потока, масштабы физических пространственных гидравлических моделей, как жесткой (недеформируемой), так и полуразмываемой, были назначены равными 1:250 (горизонтальный) и 1:100 (вертикальный).

На рис. 1 представлен общий вид на полуразмываемую физическую модель исследуемого участка. Красной линией выделена зона, выложенная кварцевым песком.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОЙ (НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ) ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И НА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ, СОЗДАННОЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА HEC-RAS

3.1. Исходные данные для моделирования

В качестве исходных данных для создания цифровой модели рельефа использовалась русловая съемка участка в масштабе 1:5000.

Для создания цифровой модели расчетной области, а также для задания начальных и граничных условий использовались следующие материалы:

- данные уровенных наблюдений на стационарных и временных гидрологических постах;
- расчетные уровни и расходы воды в створе гидрологического поста Семей.

Вначале проводилась калибровка численной модели на основании натурных данных, полученных с гидрологического поста Семей. Для калибровки использовался искусственный расход воды в период осуществления судоходства на р. Иртыш, равный $625 \text{ м}^3/\text{с}$, и соответствующие этому расходу уровни воды на границах исследуемого участка. После была проведена валидация модели на расходах воды различной обеспеченности.

Анализ полученных результатов калибровки и валидации численной модели позволил определить коэффициенты шероховатости, а также начальные и граничные условия для последующей тарировки физической модели.

Для экспериментов на физической полуразмываемой модели потребовалось выполнить гранулометрический анализ речного аллювия. Состав речного

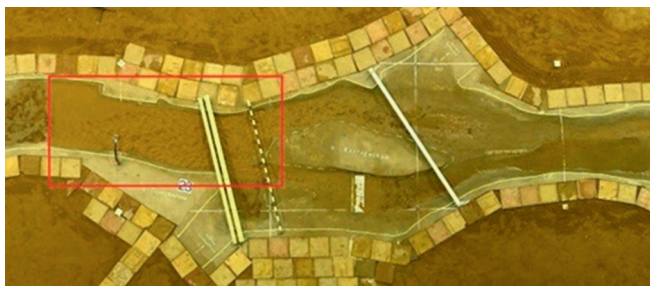


Рис. 1. Общий вид полуразмываемой физической модели исследуемого участка

Fig. 1. General view of the semi-eroded physical model of the area under study

аллювия характеризовался следующими величинами: средневзвешенный диаметр донных отложений $d_{\text{ср взв}} = 23.9 \text{ мм}$, $d_{50} = 17.8 \text{ мм}$, $d_{90} = 57.5 \text{ мм}$, для создания полуразмываемой модели использовался кварцевый песок диаметром $0.15\text{--}0.25 \text{ мм}$. При этом в ходе эксперимента контролировалось соответствие полученных на модели гряд по известным формулам расчета их высоты и длины.

Параметры численной и физической неразмываемой моделей исследуемого участка представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Параметры ЦМР и численной модели р. Иртыш

Table 1. Parameters of the DEM and numerical model of the Irtysh River

№ п/п	Наименование параметра ЦМР	Параметры расчетной области
1	Размер расчетной области, км	6×1
2	Отметки рельефа, м БС	$187.34 \div 195.8$
3	Размер ячейки расчетной сетки в русле, м	15×15
4	Размер ячейки расчетной сетки на ГТС, м	5×5
5	Общее количество расчетных ячеек (контрольных объемов) в плане	$11\ 588 \div 11\ 694$ элемента
6	Коэффициент шероховатости при $Q = 625 \div 800 \text{ м}^3/\text{с}$	$n = 0.03$
7	Коэффициент шероховатости при $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$	$n = 0.026$

Таблица 2. Параметры физической жесткой модели

Table 2. Parameters of the physical rigid model

№ п/п	Наименование	Масштабные множители натура/модель
1	Линейная величина в горизонтальной плоскости	250
2	Линейная величина в вертикальной плоскости	100
3	Площадь в горизонтальной плоскости	62 500
4	Скорость течения	10
5	Расход воды	250 000
6	Уклон потока	0.4
7	Время гидравлических процессов	25



Рис. 2. Схема расположения гидротехнических сооружений

Fig. 2. The layout of hydraulic structures

Для решения поставленной задачи по обеспечению гарантированных глубин на перекатах Верхний и Нижний Жанасемейские были предложены три варианта гидротехнических сооружений (рис. 2).

Цифрой «1» отмечена поперечная запруда, цифрой «2» — продольная запруда, цифрой «2.1» обозначена продольная запруда с отличным от «2» положением, цифрой «3» — струнаправляющая дамба в конце о-ва Кругленький.

Изначально моделировать варианты гидротехнических сооружений было решено с помощью численной модели, с целью нахождения параметров запруд. В качестве основных вариантов были рассмотрены следующие решения:

1. Строительство продольной запруды, полностью перекрывающей в межень (при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$) правый рукав р. Иртыш в районе о-ва Кругленький (далее — продольная запруда).

2. Возведение в правом рукаве р. Иртыш в районе о-ва Кругленький поперечной запруды, перекрывающей в межень правый рукав р. Иртыш (далее — поперечная запруда).

Эффективность каждого из вариантов решения оценивалась путем сравнения отвечающих этим вариантам значений расчетных характеристик отметок водной поверхности с их значениями при бытовом состоянии русла (далее — БСР) и при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$.

3.2. Оценка эффективности повышения гарантированных глубин путем строительства продольной запруды

В качестве первого варианта был рассмотрен вариант строительства в районе Старого и Железнодорожного мостов между о-вами Бейбитшилик и Кругленький продольной (меженной) запруды, полностью перекрывающей в межень при $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ правый рукав р. Иртыш возле о-ва Кругленький.

Задаваемые для расчета на численной модели параметры гидротехнического сооружения представлены в табл. 3.

С помощью модели HEC-RAS для расхода воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ в русле с продольной запрудой были рассчитаны распределение расходов воды по рукавам, огибающим о-в Кругленький, осредненные по глубине скорости течения, отметки свободной поверхности потока и глубины потока. Результаты расчетов сравнивались с расчетами аналогичных характеристик для бытового состояния русла.

Анализ полученных результатов показывает, что при наличии продольной запруды при расходе воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость течения в начале судоходного рукава значительно увеличивается по сравнению с бытовым состоянием русла (до $\approx 0.75 \text{ м/с}$), а в конце судоходного рукава она увеличивается еще больше и достигает 1.5 м/с . Такие изменения скорости течения связаны с тем, что при $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ возведение продольной запруды приводит к перемещению всего потока из правого рукава возле о-ва Кругленький в левый (судоходный) рукав. При этом по правому рукаву возле о-ва Кругленький продолжится поступление небольшого количества воды из вышележащего правого рукава возле о-ва Бейбитшилик.

Распределение расхода воды по рукавам в бытовом состоянии русла (без ГТС) и в случае строительства продольной запруды при расходе воды на исследуемом участке $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ представлено в табл. 4.

Сравнение продольных профилей свободной поверхности потока при бытовом состоянии русла и в русле с продольной запрудой при расходе воды

Таблица 3. Характеристики продольной запруды / Table 3. Characteristics of the longitudinal dam

№ п/п	Наименование параметра ГТС	Параметры ГТС
1	Длина по гребню, м	340
2	Отметка гребня, м БС	185.50
3	Максимальная высота ГТС, м	4.00
4	Ширина по гребню, м	20

Таблица 4. Распределение расхода воды по рукавам при бытовом состоянии русла и с возведенной продольной запрудой

Table 4. Distribution of water consumption along the arms in the case of a domestic channel condition and with a built longitudinal dam

Состояние русла	Математическая модель		Физическая модель	
	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав
	Q = 625 м ³ /с		Q = 625 м ³ /с	
Бытовое	291 м ³ /с	334 м ³ /с	282 м ³ /с	343 м ³ /с
Продольная запруда	625 м ³ /с	0	623 м ³ /с	0

625 м³/с представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, результаты численного моделирования и моделирования на жесткой гидравлической модели дают близкие результаты, что свидетельствует о достоверности расчетов на программном комплексе HEC-RAS, а также о качественной настройке гидравлической модели.

Анализ результатов расчетов и измерений показывает, что при возведении продольной запруды при межennem расходе воды $Q = 625$ м³/с повышение отметок свободной поверхности потока по сравнению с бытовым состоянием русла достигает 92 см на судовом ходе. Соответственно возрастают и глубины на лимитирующем перекате, что удовлетворяет потребности судоходства.

Таким образом, можно сделать вывод, что строительство продольной запруды позволит достичь гарантированных глубин на обоих объектах ис-

следования – Верхнем Жанасемейском и Нижнем Жанасемейском перекатах.

Однако при этом у приверха о-ва Кругленький в створе железнодорожного моста при прохождении расхода воды (625 м³/с) возникают косоструйные течения со скоростью до 1.5 м/с, осложняющие условия прохождения судов под мостом.

В связи с этим для снижения негативного влияния продольной дамбы на судоходные условия в створе железнодорожного моста была предпринята попытка изменить положение продольной запруды. Новое положение запруды показано на рис. 2 меткой «2.1».

После изменения положения продольной запруды были проведены дополнительные эксперименты на физической и численной моделях. На основании полученных результатов сделан вывод: полностью избавиться от эффекта косоструйного

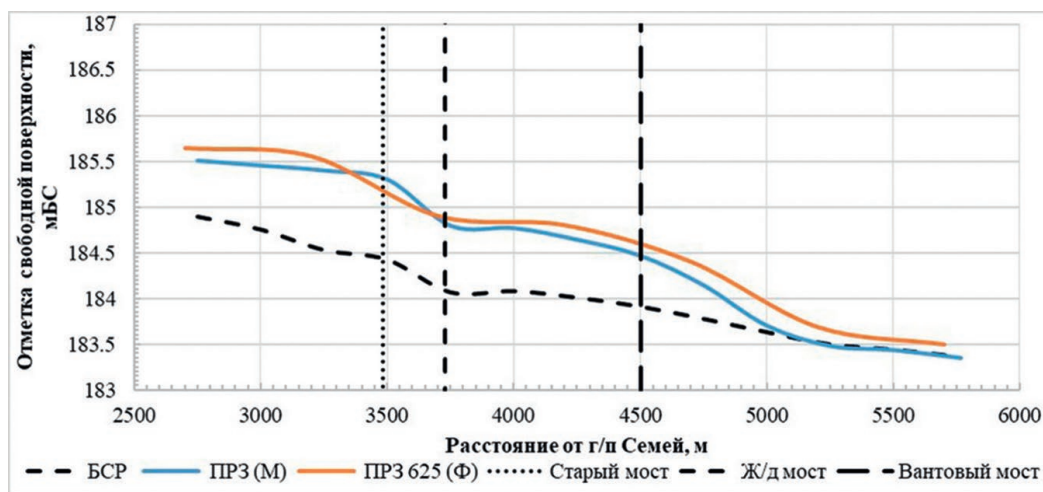


Рис. 3. Сравнение продольных профилей свободной поверхности воды на судовом ходе, полученных с помощью физической и численной моделей при бытовом состоянии русла (без ГТС) и при наличии продольной запруды ($Q = 625$ м³/с)

Fig. 3. Comparison of the longitudinal profiles of the free water surface on the ship's course, obtained using physical and numerical models in the case of the channel's living condition (without GTS) and in the presence of a longitudinal dam ($Q = 625$ м³/s)

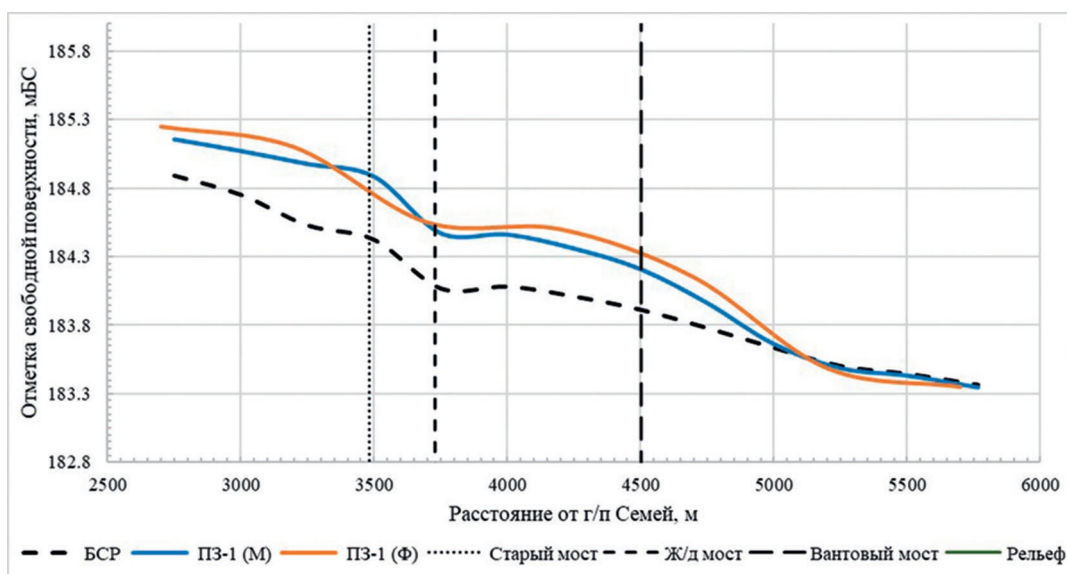


Рис. 4. Продольные профили свободной поверхности воды на судовом ходе при бытовом состоянии русла (без ГТС) и в случае строительства поперечной запруды ($Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$)

Fig. 4. Longitudinal profiles of the free water surface on the ship's passage in the case of the channel's domestic condition (without GTS) and in the case of the construction of a transverse dam ($Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$)

течения при возведении продольной запруды № 2 не представляется возможным в связи с перераспределением всего расхода воды в один рукав. Однако новое положение ГТС снижает скорость косоструйных течений до 1 м/с, что улучшает условия судоходства в створе железнодорожного моста.

3.3. Оценка эффективности увеличения гарантированных глубин путем строительства поперечной запруды в правом рукаве

В качестве альтернативного варианта решения поставленной задачи был рассмотрен вариант строительства в правом (несудоходном) рукаве р. Иртыш возле о-ва Кругленький поперечной запруды.

Параметры этого гидротехнического сооружения представлены в табл. 5.

На жесткой (недеформируемой) физической и математической моделях для расхода воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ в русле с поперечной запрудой были

Таблица 5. Параметры поперечной запруды

Table 5. Parameters of the transverse dam

№ п/п	Наименование параметра ГТС	Параметры ГТС
1	Длина по гребню, м	185
2	Отметка гребня, м БС	184.36
3	Максимальная высота ГТС, м	3.36
4	Ширина по гребню, м	10

измерены и рассчитаны распределение расходов воды по рукавам, огибающим о-в Кругленький, осредненные по глубине скорости течения и отметки свободной поверхности. Результаты расчетов и экспериментов сравнивались с расчетами аналогичных характеристик для бытового состояния русла.

Распределение расходов воды по рукавам, установленное на физической и математической моделях, при значении общего расхода воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$ приведено в табл. 6.

Результаты расчета и измерения отметок водной поверхности при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$ при бытовом состоянии русла и при наличии поперечной запруды представлены на рис. 4.

Анализ результатов расчетов и измерений показывает, что при возведении поперечной запруды с параметрами, указанными в табл. 5, при расходе воды $Q = 625 \text{ м}^3/\text{с}$ происходит повышение отметок свободной поверхности по судовому ходу до 62 см по сравнению с бытовым состоянием русла. Соответственно, возрастают и глубины на лимитирующих перекатах, чего достаточно для удовлетворения требований судоходства.

Расхождение в отметках между математической и физической моделями достигает в среднем всего лишь 10 см, что объясняется, по всей видимости, разной технологией установления шероховатости на моделях (локализованной на физической модели и одинаковой по всему межвенному руслу в математической).

Таблица 6. Распределение расходов воды по рукавам при наличии поперечной запруды при общем расходе воды 625 м³/с**Table 6.** Distribution of water flow through the sleeves in the presence of a transverse dam with a total water flow of 625 м³/с

Состояние русла	Математическая модель		Физическая модель	
	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав	судоходный (левый) рукав	несудоходный (правый) рукав
	Q = 625 м ³ /с		Q = 625 м ³ /с	
Бытовое	291 м ³ /с	334 м ³ /с	282 м ³ /с	343 м ³ /с
При поперечной запруде	467 м ³ /с	157 м ³ /с	452 м ³ /с	171 м ³ /с

Таким образом, можно сделать вывод, что данное решение — строительство поперечной запруды с указанными параметрами — позволит достичь гарантированных глубин на обоих лимитирующих перекатах: Верхнем Жанасемейском и Нижнем Жанасемейском.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В РУСЛЕ Р. ИРТЫШ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ЗАПРУД И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТНЫМ МЕРОПРИЯТИЯМ НА УЧАСТКАХ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ

Анализ деформаций в русле реки, связанных со строительством запруд, был осуществлен в ходе экспериментов на пространственной полуразмываемой гидравлической модели.

Для воспроизведения на модели р. Иртыш состава руслоформирующих наносов в природных условиях из русловых отвалов были отобраны четыре пробы руслоформирующих наносов, гранулометрический состав которых был определен фотометодом. Средний диаметр руслоформирующих наносов в природных условиях составил 2.3 см.

При создании пространственной полуразмываемой гидравлической модели на размываемой части жесткой модели из песка диаметром 0.15–0.25 мм по съемке 2023 г. было воспроизведено морфологическое строение русла Иртыша, а затем последовательно сооружены продольная и поперечная запруды в соответствии с рис. 2.

Эксперименты на участках расположения запруд проводились при пропуске расхода воды $Q = 3500$ м³/с (расход воды в половодье) при наличии отдельно поперечной и продольной запруд.

4.1. Оценка деформаций дна, вызванных строительством продольной запруды

В ходе проведения экспериментов были получены данные о размывах и намывах в районе строительства запруды, представленные поперечными профилями дна в четырех створах, расположенных

на расстоянии 270 м (створ 1) и 160 м (створ 2) выше по течению от железнодорожного моста и на 25 м (створ 3) и 160 м (створ 4) ниже по течению железнодорожного моста, в бытовых условиях, при наличии продольной запруды без защитных гибких железобетонных матов и при их наличии, представленными на рис. 5.

Как следует из анализа результатов измерений, продольная запруда влияет незначительно на развитие деформаций в основном русле при максимальном расходе воды $Q = 3500$ м³/с. Однако при этом вдоль самой запруды наблюдаются значительные локальные размывы дна (рис. 6).

Эти локальные размывы дна заключаются в формировании вдоль нижней по течению границы запруды продольной ямы размыва глубиной до 5 м и в формировании ямы размыва вдоль верхней по течению границы запруды в районе опоры нового автомобильного моста глубиной до 2–3 м. Причиной формирования ямы размыва в нижнем бьефе продольной запруды при ее переливе при прохождении расхода воды $Q = 3500$ м³/с является продольный вихрь, формирующийся за запрудой.

Поскольку оба размыва дна вдоль тела продольной запруды угрожают ее устойчивости, было предложено осуществить отсыпку крупным валунным материалом вокруг основания опоры нового автомобильного моста, а вдоль нижней по течению границы запруды уложить полосу стандартных гибких железобетонных матов (рис. 7).

Выполненная на модели экспериментальная оценка этих мероприятий подтвердила их эффективность.

4.2. Оценка деформаций, возникающих в районе возведения поперечной запруды

Экспериментальные исследования деформаций дна при возведении поперечной запруды проводились также при пропуске расхода воды $Q = 3500$ м³/с.

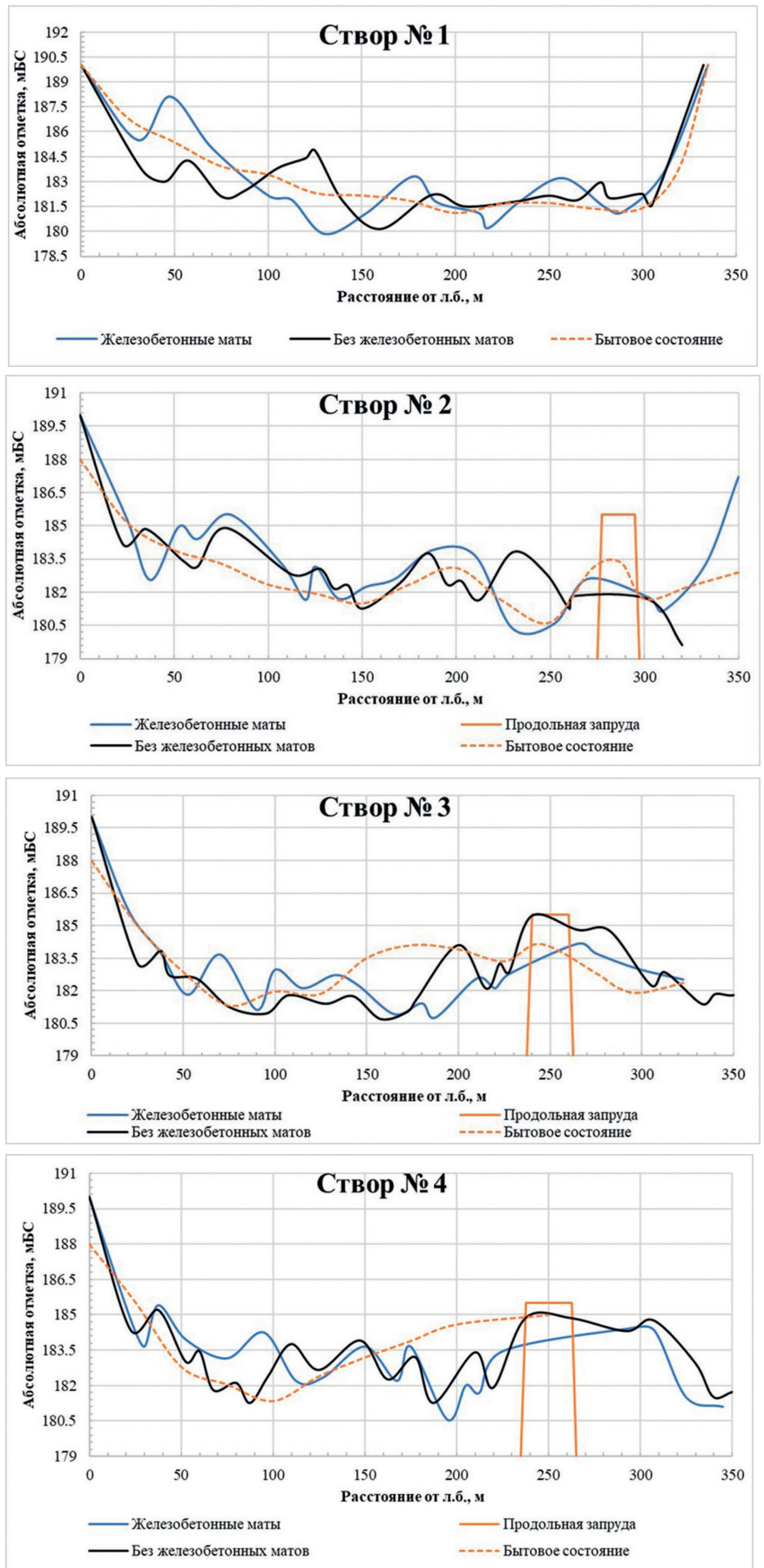


Рис. 5. Поперечные профили русла после прохождения расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ в бытовом состоянии русла и при наличии продольной запруды с укреплением железобетонными матами и без них

Fig. 5. Comparison of the transverse profiles of the bottom with a built longitudinal dam in the presence of reinforced concrete mats and without, gate, after passing the water flow rate $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$



Рис. 6. Яма размыва в нижнем и верхнем бьефах продольной запруды после прохождения максимального расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 6. Washout pit in the lower and upper reaches of the longitudinal dam after passing the maximum water flow rate of $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$

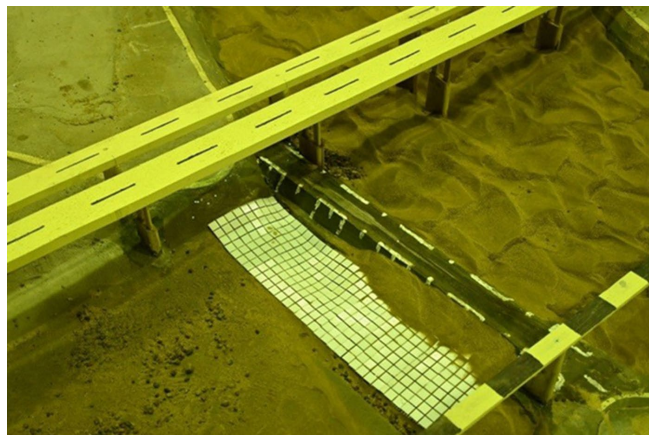


Рис. 7. Последствия прохождения максимального расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ при реализации предложенных защитных мероприятий у продольной запруды

Fig. 7. Consequences of passing the maximum water flow $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ during the implementation of the proposed protective measures at the longitudinal dam

В ходе исследований были получены данные о размывах и намывах дна в нижнем бьефе поперечной запруды, представленные на рис. 9. Для ликвидации этих размывов была предложена укладка гибких железобетонных матов в нижнем бьефе запруды (см. рис. 8).

Сравнение результатов измерения размывов дна при отсутствии и при наличии гибких матов показало, что яма размыва при отсутствии матов достигает отметки 178.6 мБС, что на 2.4 м глубже, чем при наличии укрепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из основных выводов, сделанных на основании данной работы, является хорошее

схождение результатов расчетов, выполненных на основе математической модели, и результатов экспериментов на физической модели. Это в свою очередь позволяет с уверенностью говорить об эффективности предлагаемых решений для улучшения судоходных условий на Нижнем и Верхнем Жанасемейских перекатах.

Для увеличения гарантированных глубин на лимитирующих перекатах рассматривались два оптимальных гидротехнических сооружения:

- продольная запруда, высотой в гребне 4.00 м (185.5), полностью перекрывающая в межень (при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$) правый рукав р. Иртыш в районе о-ва Кругленький;
- поперечная запруда в правом рукаве р. Иртыш в районе о-ва Кругленький со следующими харак-

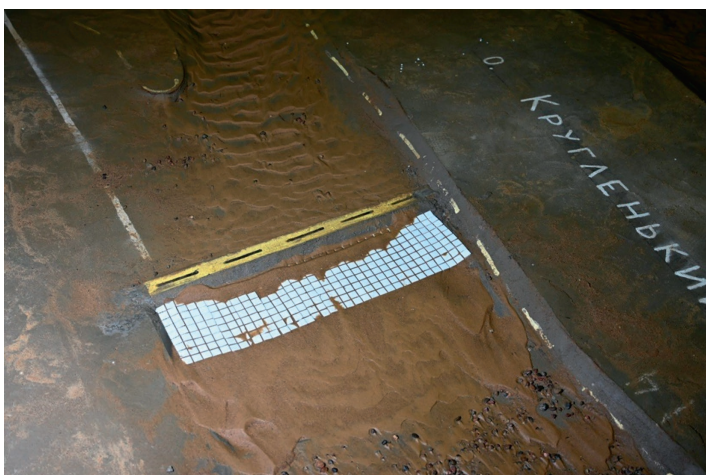


Рис. 8. Вид на поперечную запруду с укреплением нижнего бьефа имитацией железобетонных матов

Fig. 8. View of a transverse dam with reinforcement of the downstream bank by imitation of reinforced concrete mats

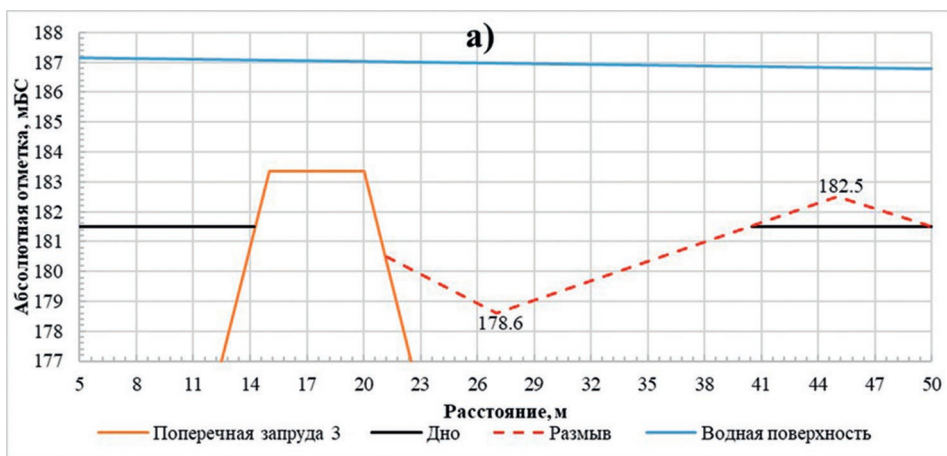


Рис. 9. Последствия прохождения максимального расхода воды $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ при наличии поперечной запруды: а) без укрепления нижнего бьефа; б) с укреплением нижнего бьефа железобетонными матами

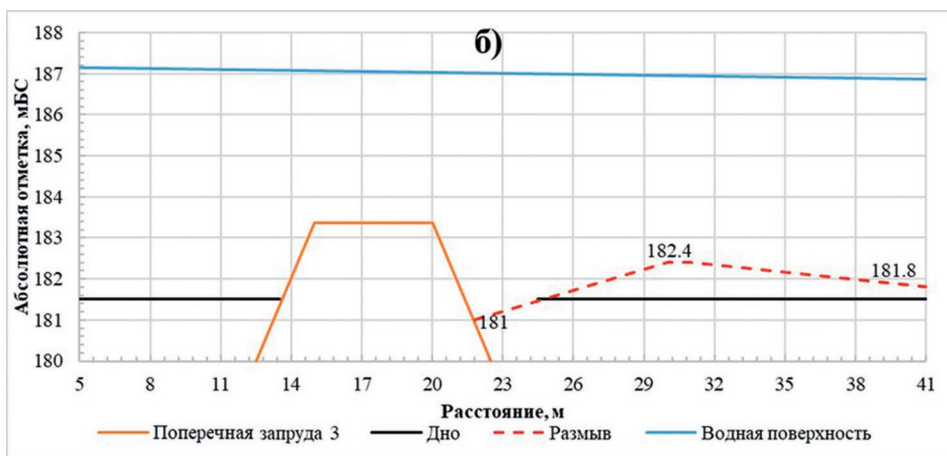


Fig. 9. The consequences of passing the maximum water flow rate $Q = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ in the presence of a transverse dam: а) without strengthening the lower reaches; б) with reinforcement of the lower reaches with reinforced concrete mats

теристиками: длина 185 м и высота 3.36 м (отметка по гребню 184.36 м БС).

Строительство продольной запруды позволяет достичь максимальной эффективности поднятия гарантированных глубин на Нижнем и Верхнем Жанасемейских перекатах по сравнению с бытовым состоянием русла. При реализации данного мероприятия при расходе воды $625 \text{ м}^3/\text{с}$ разница в глубинах на лимитирующих участках переката достигает 92 см, этого достаточно для осуществления судоходства на данном участке.

К недостатку данного варианта регулирования судоходных условий на перекатах следует отнести наличие на судовом ходу в створе железнодорожного моста зоны косоструйных течений со скоростями до 1 м/с.

При возведении любого из вариантов запруды (продольной или поперечной) нижний бьеф этих запруд должен быть в обязательном порядке укреплен полосой стандартных железобетонных гибких матов, а при возведении продольной запруды основание прибрежной опоры проектируемого автомобильного моста и смежная с ней верхняя часть верхнего бьефа продольной запруды должны быть отсыпаны крупным валунным материалом.

На основе проведенного анализа статьи можно сформулировать следующий вывод о преимуществах и полезности совместного применения методов математического (численного) и физического моделирования:

Необходимость комбинированного использования математического и физического моделирования обусловлена тем обстоятельством, что в структуры современных математических моделей заложена бесструктурная (безгрядовая) форма движения донных наносов, в то время как в натуральных условиях движение донных наносов осуществляется в грядовых формах, что и определяет режим деформаций дна на границах инженерных сооружений. Расчеты на математических моделях позволяют достоверно установить гидравлические характеристики речного потока (уклоны, уровни, скорости и структуру течений), необходимые для тарировки физической модели, и при различных вариантах компоновки инженерных сооружений. В то же время методически корректно созданные физические модели позволяют достоверно воспроизвести грядовую форму движения донных наносов и оценить возможные деформации речного дна на границах инженерных сооружений при грядовой форме их движения.

Совместное применение численного моделирования (с использованием программного комплекса HEC-RAS) и физического моделирования на жесткой (недеформируемой) и полуразрываемой моделях продемонстрировало высокую эффективность и взаимодополняемость этих методов при решении сложных инженерно-гидрологических задач, таких как улучшение судоходных условий на реках.

Ключевые преимущества гибридного подхода:

– Результаты, полученные на математической и физической моделях, показали хорошее сходжение. Это позволяет с высокой степенью уверенности утверждать, что и численная модель, построенная с помощью программного комплекса HEC-RAS, была адекватно настроена, и физическая модель корректно воспроизводила натурные условия. Взаимная проверка позволяет повысить общую надежность рекомендаций.

– Численное моделирование позволило быстро и с меньшими затратами проанализировать множество вариантов расположения запруд и их параметры на начальном этапе исследований. Физическое моделирование, в свою очередь, предоставило возможность убедиться в достоверности результатов математического моделирования гидравлических характеристик потока и детально изучить режим транспорта донных наносов в грядовой форме в бытовых условиях и при наличии запруд, а также их визуализировать.

Гибридное моделирование позволило не только оценить эффективность предлагаемых решений по повышению глубин на лимитирующих перекатах в меженьный период (при расходе воды 625 м³/с), но и исследовать потенциально негативные последствия их реализации, такие как:

1) возникновение косоструйных течений, установленное на математической модели, что привело к корректировке положения продольной запруды для снижения их скорости;

2) размывы дна в паводок (при расходе воды 3500 м³/с), которые были детально изучены на полуразрываемой физической модели. Это позволило разработать и экспериментально подтвердить эффективность защитных мероприятий (укрепление железобетонными матами и валунной отсыпкой), что было бы крайне затруднительно сделать только с помощью численной модели.

Таким образом, комбинированное использование численного и физического моделирования является надежным инструментом при гидравлическом моделировании. Оно сочетает в себе скорость и гибкость компьютерного анализа с наглядностью и высокой достоверностью натурального физического эксперимента. Этот «симбиоз» позволяет не только найти оптимальное техническое решение, но и все-

сторонне оценить его долгосрочные последствия, минимизировать риски и обосновать инвестиции в строительство гидротехнических сооружений. В рамках данного исследования гибридное моделирование успешно доказало свою полезность для разработки научно обоснованных рекомендаций по улучшению судоходных условий на р. Иртыш.

ЛИТЕРАТУРА

Исследование условий заносимости водозаборных сооружений для различных компоновочных решений с использованием 3D численных моделей. АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2023.

Католиков В.М. Проблемы моделирования деформаций речных русел в свете дискретного характера транспорта руслоформирующих наносов в реках // VI международная научно-практическая конференция «Гришанинские чтения». «Водные пути и русловые процессы, гидротехнические сооружения водных путей» – Сборник научных трудов. Вып. 6, т. 1. СПб: Изд. ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2023. С. 44–57.

Клаев А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История, 2011. 504 с.

Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.

Лоцманская карта реки Иртыш от Шульбинской ГЭС до села Майтубек. Семейский филиал РГКП «Казакстан су жолдары», 2024.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Отдела русловых процессов ГГИ Католиковой Н.И. за существенную помощь при редактировании статьи.

ОБ АВТОРАХ

Щеглов Денис Александрович, младший научный сотрудник отдела русловых процессов Государственного гидрологического института. Рабочий адрес: 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23.

E-mail: obyvanky45@gmail.com

Католиков Виктор Михайлович, заведующий отделом русловых процессов Государственного гидрологического института, ведущий научный сотрудник, к.т.н., доцент по специальности «Гидравлика и инженерная гидрология». Рабочий адрес: 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23.

E-mail: v.katolikov@mail.ru

IMPROVEMENT OF NAVIGATION CONDITIONS ON THE IRTYSH RIVER IN THE SEMEY AREA BASED ON HYBRID MODELING

Denis Alexandrovich Shcheglov, Victor Mikhailovich Katolikov

FSBI «State Hydrological Institute», Saint Petersburg, Russia

Obyvanky45@gmail.com

Annotation. The article presents the results of a comprehensive study aimed at improving navigable conditions in the limiting section of the Irtysh River in the Semey area (Upper and Lower Zhanasemeisky ridges, 2900-2904 km of navigation). The research is based on the methodology of hybrid (combined) hydraulic modeling, which integrates numerical calculations in the HEC-RAS software package and experiments on a spatial physical model.

The purpose of the work is a comparative analysis of the effectiveness and justification of the parameters of two variants of regulating hydraulic structures (longitudinal and transverse dams) to ensure guaranteed depths during the inter-ice period. Verification of the numerical model and calibration of the physical model based on field observations were carried out. It was found that both options provide a significant increase in water levels (up to 92 cm for the longitudinal and up to 62 cm for the transverse dam) at an intermediate flow rate of 625 m³/s. A negative effect in the form of a cross-jet flow (up to 1.5 m/s) was identified and quantified for the option with a longitudinal dam, which required correction of its position. Using a semi-collapsible physical model, morphodynamic processes during the flood period (flow rate of 3500 m³/s) were studied and areas of potential erosion threatening the stability of structures were identified. Engineering measures to protect against erosion (reinforcement with flexible reinforced concrete mats and boulder filling) have been developed and tested on the model for each variant. The complementarity and high efficiency of combining numerical and physical modeling methods to obtain reliable and integrated engineering solutions are proved.

Keywords: Irtysh River, navigable conditions, ripples, numerical modeling, HEC-RAS, physical modeling, hydraulic structures, channel deformations, erosion

REFERENCES

Investigation of the conditions of water intake structures for various layout solutions using 3D numerical models. JSC VNII-IG named after B.E. Vedeneev, 2023.

Katolikov V.M. Problems of modeling riverbed deformations in the light of the discrete nature of riverbed-forming sediment transport in rivers // VI International scientific and practical conference «Grishaninsky readings» «Waterways and riverbed processes, hydraulic structures of waterways» - Collection of scientific papers, Issue 6, vol. 1. St. Petersburg: GUMRF Publishing House named after S.O. Makarov, 2023, p. 44–57

Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and riverbed process. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. 504 p.

Kondratiev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Fundamentals of the hydromorphological theory of the riverbed process L.: Gidrometeoizdat, 1982. 272 p.

Pilot map of Irtysh from Shulbinskaya HPP to Sela Maitubek. Semey branch of RGCP «Kazakhstan waterways», 2024.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank N.I. Katolikova, Senior Researcher at the Department of Riverbed Processes at the GGI, for her substantial assistance in editing the article.

ABOUT THE AUTHORS

Shcheglov Denis Alexandrovich, Junior Researcher at the Department of Riverbed Processes of the State Hydrological Institute. Working address: 199004, Saint Petersburg, 2nd line V.O., 23. E-mail: obyvanky45@gmail.com

Katolikov Victor Mikhailovich Head of the Department of Riverbed Processes, Senior Researcher, KTN, Associate Professor specializing in “Hydraulics and Engineering Hydrology”. Working address: 199004, Saint Petersburg, 2nd line V.O., 23. E-mail: v.katolikov@mail.ru

ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА СРЕДНЕЙ И НИЖНЕЙ ВОЛГЕ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЧНОГО СТОКА

Г.Л. Гладков^{1*}, П.В. Беляков¹, А.О. Еремеева²,
А.Н. Ситнов³, Ю.Е. Воронина³

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

³Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

*gladkovgl@gumrf.ru

Поступила в редакцию 12.01.2026

После доработки 20.03.2026

Принята к публикации 13.04.2026

Аннотация: представлены результаты комплексных исследований гидроморфологического режима Нижней Волги на двух участках: в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на Волго-Каспийском морском судоходном канале. Впервые объединены многолетние гидрологические и русловые наблюдения (с 1877 г. по настоящее время) с данными математического моделирования. Используются методы корреляционно-регрессионного анализа, оценки обеспеченности уровней, сопоставления планов русловых съемок. Установлено, что в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС после 40 лет эксплуатации интенсивность эрозионных деформаций снизилась до 1.1 см/год, а корреляция уровней воды между постами «нижний бьеф ГЭС» и «с. Козловка» составляет 0.927, что свидетельствует об отсутствии необратимого падения уровней, связанного с разработкой русловых карьеров. На Волго-Каспийском канале доказано, что понижение уровня Каспийского моря провоцирует ускоренную трансформацию канала в речное русло с формированием перекатов, побочной и грядового рельефа, что ведет к росту заносимости и потребует увеличения объемов дноуглубления. Полученные результаты имеют прикладное значение для планирования дноуглубительных работ, оптимизации режимов попусков гидроузлов и расположения отвалов грунта.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, транспорт наносов, параметры донных гряд, русловые переформирования, Волго-Каспийский канал, Чебоксарская ГЭС

DOI: [10.71367/3034-4638-2026-1-1-58-88](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2026-1-1-58-88)

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние внутренних водных путей России, в частности Средней и Нижней Волги, характеризуется комплексным воздействием климатических изменений и антропогенной деятельности. Строительство каскада гидроузлов, регулирование речного стока, добыча нерудных строительных материалов, а также наблюдаемое потепление климата и изменение водности рек привели к значительной трансформации гидрологического и руслового режима. На отдельных участках эти изменения стали критическими для обеспечения безопасности судоходства, что требует

реконструкции существующих гидротехнических сооружений и совершенствования методов содержания судовых ходов.

Нижняя Волга является стратегической водной артерией России, обеспечивающей транзитное судоходство, выход в Каспийское море и функционирование крупных портов. За последние десятилетия ее гидрологический и русловый режим претерпел значительные изменения под влиянием двух групп факторов. Первая — климатические изменения: повышение температуры воздуха (тренд 0.14 °C/10 лет), перераспределение внутригодового стока (рост зимних попусков, снижение весеннего половодья), а с 2006 г. — устойчивая маловодная

фаза. Вторая — антропогенное воздействие: строительство каскада Волжско-Камских ГЭС, суточное и недельное регулирование стока, многолетняя добыча нерудных строительных материалов из русла.

Цель работы — выявление современных тенденций русловых деформаций на двух ключевых участках Средней и Нижней Волги (нижний бьеф Чебоксарской ГЭС и Волго-Каспийский морской судоходный канал), оценка их влияния на судоходные условия и обоснование мер по обеспечению гарантированных габаритов судовых ходов.

Задачи исследования:

1. Проанализировать многолетний (1877–2022 гг.) ход расходов и уровней воды в створе Чебоксарской ГЭС и на посту Козловка, выявить периоды различной водности и тренды.
2. Оценить интенсивность русловых деформаций на судовом ходу в нижнем бьефе гидроузла по данным карт внутренних водных путей за 1968–2022 гг.
3. Установить наличие и тесноту корреляционной связи между уровнями воды в нижнем бьефе и в удаленном створе для оценки влияния карьерных разработок.
4. На основе совмещенных планов Волго-Каспийского канала за 2020–2024 гг. выявить характер переформирований (формирование побочней, перекаатов, гряд) и определить причины ускорения заносимости.
5. Сформулировать рекомендации для практического обеспечения судоходства.

1. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА РЕКИ ВОЛГИ И УСЛОВИЯ СУДОХОДСТВА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ЧЕБОКСАРСКОГО ГИДРОУЗЛА

Основная особенность гидрологического и руслового режима в нижних бьефах бесподпорных гидроузлов заключается в том, что ниже створа гидроузла с самого начала его эксплуатации вследствие перехвата твердого стока развивается и прогрессирует эрозия русла, что приводит к необратимому снижению уровня воды и ухудшению судоходных условий. Основным фактором, обуславливающим эрозионные процессы в нижних бьефах, является работа ГЭС. Добыча нерудных строительных материалов и другие инженерные мероприятия в нижних бьефах гидроузлов могут негативным образом сказаться на уровненом режиме реки и привести к интенсификации деформаций размыва речного русла.

В результате осуществления недельного и суточного регулирования стока в меженные периоды

навигации на участках водного пути, расположенных в нижних бьефах гидроузлов, движение воды приобретает неустановившийся характер. При этом нарушается однозначность связи между расходом и уровнем воды. В моменты прохождения максимальных попусковых расходов воды на судовом ходу возрастает скорость течения и активизируется транспорт наносов, что приводит к усилению заносимости дноуглубительных прорезей и нарушению устойчивости судовых ходов.

При малых расходах воды в ночное время суток, напротив, эти процессы затухают. При этом на участке водного пути устанавливаются минимальные уровни воды и судоходные глубины, лимитирующие прохождение крупнотоннажных судов.

Чебоксарский гидроузел, завершающая ступень Волжского гидроэнергетического каскада, проектировался и строился с целью создания в европейской части России единого глубоководного пути с гарантированной глубиной судового хода, равной 4 м, а также для регулирования стока Волжского бассейна в интересах водного транспорта, сельского хозяйства, снижения паводковых затоплений в нижнем бьефе и обеспечения водоснабжения крупных населенных пунктов за счет использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища. Планировалось соединение транспортными магистралями Чувашской Республики с Республикой Марий Эл, Республикой Татарстан, Кировской областью, а также увеличение мощности электростанций в ЕЭС европейской части России на 1.4 млрд кВт и среднегодовой выработки на 3.5 млрд кВт·ч.

Строительство Чебоксарского гидроузла было начато в 1969 г. по утвержденному в 1967 г. и уточненному в 1974 г. техническому проекту. Все сооружения гидроузла строились под проектную отметку водохранилища — 68.0 м БС и затрагивали интересы трех субъектов Российской Федерации — Чувашской Республики (16.5%), Республики Марий Эл (52%) и Нижегородской области (31.5%). В связи с неполной готовностью зоны затопления и незавершенными работами по защите земель и населенных пунктов в 1981 г. по соглашению с данными субъектами РФ было решено заполнить водохранилище на 2–3 года до промежуточной отметки 63.0 м БС.

По ряду причин до настоящего времени гидроузел продолжает работать при промежуточной отметке 63.0 м БС в непроектном режиме. Строительство ни одного из 19 объектов инженерной защиты в зоне водохранилища полностью не завершено (в т. ч. и для отметки 63.0 м БС), гидроузел не сдан в постоянную эксплуатацию, а финансирование

работ по обустройству зоны водохранилища было прекращено.

При эксплуатации Чебоксарского гидроузла с регламентированной подпорной отметкой 63.0 м БС приточные расходы воды круглогодично пропускаются транзитом в нижний бьеф. Водоохранилище осуществляет только суточное перераспределение притока к гидроузлу в интересах энергетики. Форсировка уровня воды сверх отметки 63.0–63.3 м БС производится лишь в половодья с вероятностью превышения менее 10%.

Куйбышевское водохранилище было образовано в результате перекрытия Волги плотиной Волжской гидроэлектростанции в Тольятти в 1955 г. Оно заполнено до проектной отметки в 53.0 м БС. Водоохранилище располагается на территории Самарской, Ульяновской областей, Республик Татарстан, Марий Эл и Чувашской Республики. Площадь составляет 5900 км². Объем водохранилища составляет 56 км³; протяженность 510 км. Водоохранилище имеет сезонное регулирование стока. Колебания уровня воды составляют до 7.5 м; на территории Чувашской Республики этот показатель составляет около 4 м. Протяженность правобережной линии в пределах Чувашии составляет 89 км.

Объектом настоящего научного исследования является участок р. Волги, расположенный в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла.

Настоящая работа выполнена на основании систематизации и анализа материалов инженерных изысканий и исследований, проведенных на р. Волге в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла за разные годы, материалов многолетних наблюдений за уровнем воды на стационарном гидрологическом посту Козловка, а также с использованием аппарата математического моделирования параметров движения воды и транспорта наносов в реках.

Для оценки гидрологического режима и расчета основных гидрологических характеристик расхода и уровня воды для исследуемых створов р. Волги ниже Чебоксарской ГЭС в работе использованы данные, опубликованные в гидрологических ежегодниках и справочниках Государственного водного кадастра Росгидромета РФ по стационарным гидрологическим постам за многолетний период наблюдений, а также сведения о расходе и уровне воды за 2022–2023 гг., предоставленные Филиалом ПАО «РусГидро» – «Чебоксарская ГЭС».

В качестве исходных данных для анализа деформаций речного русла на исследуемом участке р. Волги использовались Атласы ЕГС ЕЧ РФ, том 6, ч. 1 (выпуски 1968, 1977, 2006, 2022 гг.), русловая съемка Чебоксарского речного порта за 2023 г., монографии, научные публикации и другие резуль-

таты исследований гидрологического и руслового режима р. Волги в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла.

1.1. Климатическая характеристика района. Гидрография

Средняя Волга на участке от г. Нижнего Новгорода до устья р. Камы относится к атлантико-континентальной европейской области с умеренно-теплым летом, продолжительной холодной зимой с устойчивым снежным покровом. Континентальность климата увеличивается с запада на восток. В течение года в районе преобладает влияние умеренных морских и континентальных воздушных масс. Важным фактором формирования климата является регулярная адвекция арктического и тропического воздуха. Изменчивость атмосферной циркуляции создает большую неустойчивость режима увлажнения и температуры (Георгиевский и др., 2015).

Основной особенностью современных изменений климата в бассейне Волги, как и на всей территории России, является повышение температуры воздуха с конца 70-х гг. XX в. На рис. 1.1 приведен временной ход среднегодовой температуры воздуха по м/с Чебоксары за период 1901–2017 гг. со значимым положительным трендом. Среднее значение температуры за период 1901–1977 г. составило 3.6 °С, за период 1977–2017 гг. – 4.6 °С. Градиент увеличения температуры воздуха по тренду за весь период наблюдений с 1901 по 2017 г. равен 0.14 °С /10 лет.

В теплый период года распределение температуры воздуха в бассейне реки в большей степени соответствует географической широте местности. Средняя температура самого теплого месяца (июль) составляет 16–20 °С, убывая с юга на север. В зависимости от месяца года максимальные значения температуры воздуха изменяются в пределах от 3 до 37 °С. Средняя температура воздуха за летний сезон в бассейнах средней Волги и Камы составляет около +17 °С.

В годовом режиме направлений ветра преобладают южная и западная составляющие. Среднемесячные скорости ветра заметно больше в холодное время года. На открытых пространствах скорость ветра примерно на 0.5 м/с больше по сравнению с другими ландшафтами. Средняя максимальная скорость ветра на большей части территории составляет 20–25 м/с. При порывах она может возрастать до 40 м/с и больше. Суточный ход изменения скорости ветра лучше выражен в теплое время года, и он проявляется в увеличении скорости ветра в дневные часы.

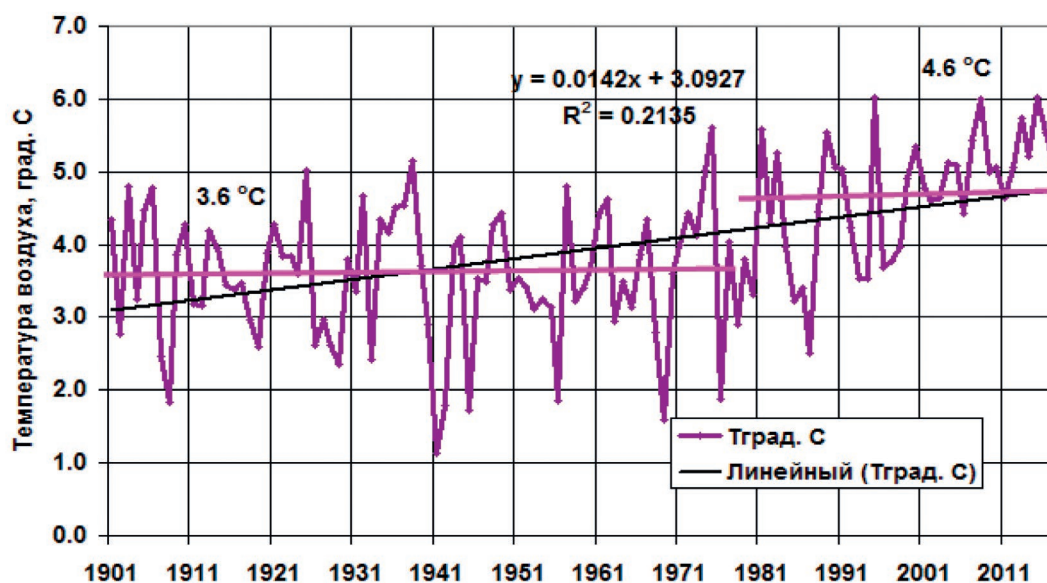


Рис. 1.1. Временной ход среднегодовой температуры воздуха по м/с Чебоксары.
Прямой черной линией показан линейный положительный тренд в 1901–2017 гг.

Fig. 1.1. Time course of the average annual air temperature by m/s Cheboksary.
The straight black line shows a linear positive trend in 1901–2017

Бассейн Волги относится к зоне достаточного увлажнения — количество осадков превышает испарение. В отдельные засушливые годы на юго-востоке региона это соотношение может меняться. На западных склонах водосборов и на возвышенных участках Валдайской, Среднерусской, Смоленско-Московской возвышенностей количество осадков возрастает. Средняя многолетняя годовая сумма осадков и сумма за теплый период убывает с северо-запада на юго-восток. Режим осадков в основном определяется циклонической деятельностью. Летом заметный вклад в изменение количества осадков и интенсивность их выпадения вносят внутримассовый характер погоды и активизация атмосферных фронтов, определяющих выпадение конвективных осадков. В зимний и летний период интенсивность осадков заметно возрастает.

Межгодовая изменчивость средних годовых сумм осадков составляет 15–20%. Среднее максимальное суточное количество осадков в году формируется обильными дождями в летние месяцы и может достигать 30–35 мм. Среднее суточное количество осадков в среднем за год составляет 3–4 мм. Жидкие осадки составляют 65–75, твердые — 15–25, смешанные — 10–15% общего количества осадков за год. Сумма осадков за холодный период года на 26% меньше, чем за теплый период. Наибольшее количество осадков (70–90 мм и более) приходится на июль. Среднее максимальное суточное количество осадков составляет 20–30 мм

и более. Наименьшая продолжительность осадков характерна для мая — августа (Алексеевский и др., 2013). Многолетнее изменение годовых значений атмосферных осадков по м/с Чебоксары за 1901–2017 гг. характеризуется положительным трендом со средним градиентом 33.1 мм /10 лет.

Снежный покров в Верхневолжском бассейне появляется в основном в последней декаде октября — первой декаде ноября. Устойчивый снежный покров образуется к концу ноября, а разрушается в первой — второй декаде апреля. Высота снежного покрова достигает наибольших значений к концу февраля — началу марта; колеблется от 160 мм и более (на северо-востоке) до 80 мм и менее на юго-западе региона.

Окончательный сход снежного покрова в среднем происходит на 4–10 дней позже по сравнению со средними датами. Продолжительность залегания снежного покрова уменьшается со 170 дней (северо-восток) до 140 дней (юго-запад бассейна). В регионе велика вероятность стаивания, проседания и уплотнения снега во время оттепелей. Плотность снежного покрова по территории меняется незначительно и составляет 230–290 кг/м³.

Речная сеть по территории бассейнов Верхней Волги распределена неравномерно. В среднем течении, ниже впадения р. Оки, Волга становится полноводной рекой. Она течет вдоль северного края Приволжской возвышенности. Правый берег Волги высокий, левый — низменный. Ниже г. Чебоксары

на Средней Волге находятся Чебоксарское и Куйбышевское водохранилища, входящие в состав водохранилищ Волжско-Камского каскада. Крупнейшие притоки р. Волги на участке от устья р. Оки до г. Казани: слева – Ветлуга, справа – Цивиль и Свияга (Шикломанов, 1989). Густота речной сети колеблется от 0.20–0.30 км/км² в средней части бассейна Оки до 0.71–0.75 км/км² в бассейне р. Ветлуги.

Особенностью строения речной сети рассматриваемого района является асимметричность водосборов рек. Долины рек хорошо выраженные, обычно трапецеидальные, с широким пойменным дном. В районах возвышенностей, особенно на правом берегу р. Волги и на отрогах Бугульминско-Белебеевской возвышенности, они более глубокие, с изрезанными оврагами склонами.

Бассейн крайне неоднороден по условиям, оказывающим влияние на формирование стока: размерам частных бассейнов, их лесистости, рельефу, распространению пород почв, распределению запасов воды в снеге, выпадению осадков, развитию речной сети, климатическим особенностям. Реки имеют широкие поймы, деформирующиеся русла, длительный период наблюдаются ледовые явления.

Создание каскада водохранилищ на Волге изменило гидрографическую сеть значительных территорий. Многие притоки р. Волги стали непосредственно впадать в водохранилища, появились заливы – затопленные устьевые участки водотоков.

Через створ Куйбышевского гидроузла проходит почти 97% волжского стока. Гидроузел перераспределяет речной сток, задерживая воду в половодье и отдавая накопленные ее запасы в период межени. Длина распространения подпора по р. Волге 650 км, по р. Каме от прежнего устья – 350 км. Наибольшая ширина водохранилища достигает 27 км (Минеева и др., 2021).

1.2. Материалы и методы

Первые инструментальные наблюдения за уровнем воды на р. Волге в районе г. Чебоксары начаты в конце 1976 г. В настоящее время на территории Верхне-Волжской УГМС действует гидрологическая наблюдательная сеть Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, включающая 16 озерных и 92 речных поста, большинство из которых были открыты в середине XX в. С 1981 г. ведутся постоянные наблюдения за объемом сброса и уровнем воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС. В табл. 1.1 приводятся сведения о гидрологических постах Росгидромета, данные которых использованы для гидрологической характеристики района исследований.

В соответствии с распоряжением Росморречфлота № АТ-531-р от 27.12.2024 в створах гидрологических постов на участке р. Волги установлены следующие значения отметок проектных уровней воды:

Таблица 1.1. Сведения о гидрологических постах Росгидромета на реке Волге

Table 1.1. Information on hydrological posts of Roshydromet on the Volga River

Код поста	Река – пост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, м БС	Дата открытия	Принадлежность поста
75016	р. Волга – г. Горький	2229	479 000	63.12	04.11.1876 по 1980	Верхне-Волжская УГМС
1500683	р. Волга – г. Горький	2229	479 000	62.00	01.09.1981	Верхне-Волжская УГМС
77024	р. Волга – г. Чебоксары	1961	604 000	49.06	13.09.1876 по 1980	Верхне-Волжская УГМС
1500817	р. Волга – г. Чебоксары	1961	604 000	62.00	12.1980	Верхне-Волжская УГМС
77025	р. Волга – НБ Чебоксарской ГЭС	1947	604 000	45.00	1981	Верхне-Волжская УГМС
3500051	р. Волга – с. Козловка	1870	615 000	45.00	04.09.1987	УГМС Республики Татарстан

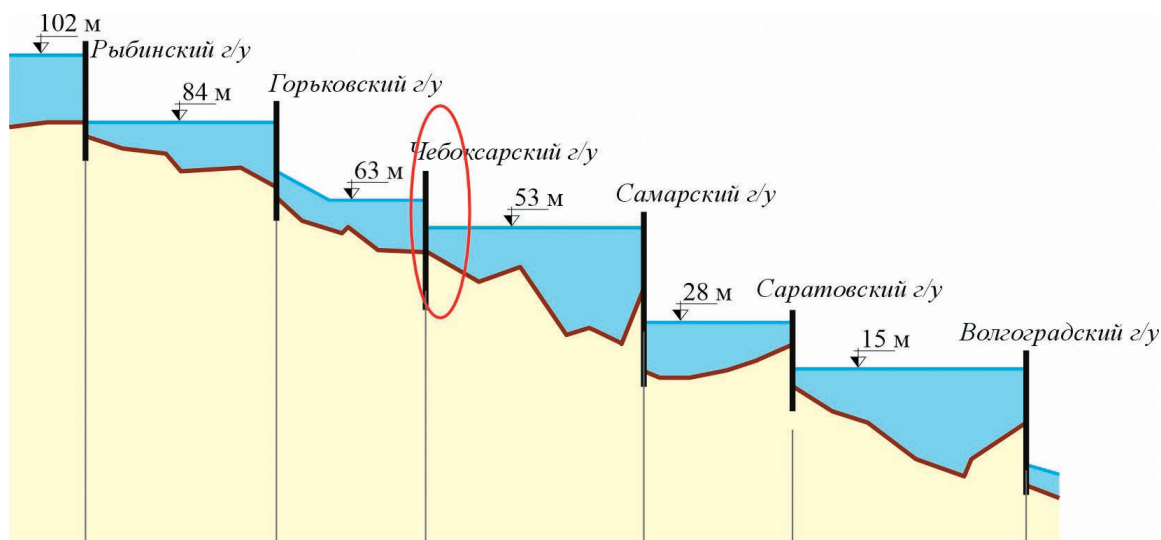


Рис. 1.2. Схематический продольный профиль р. Волги от Рыбинского до Волгоградского гидроузла

Fig. 1.2. Schematic longitudinal profile r. Volga from Rybinsk to Volgograd hydroelectric complex

- р. Волга – г. Горький (Нижний Новгород) – 63.5 м БС;
- р. Волга – ВБ Чебоксарского г/у – 63.0 м БС;
- р. Волга – НБ Чебоксарского г/у – 50.0 м БС;
- р. Волга – ВБ Самарского г/у – 49.0 м БС.

Для оценки гидрологического режима и расчета основных гидрологических характеристик расхода и уровня воды для исследуемых створов р. Волги ниже Чебоксарской ГЭС использованы данные, опубликованные в гидрологических ежегодниках и справочниках Государственного водного кадастра Росгидромета РФ за 1962–2019 гг. Определение тенденций изменения основных гидрологических характеристик уровня и расхода воды верхней Волги проводилось в соответствии с действующими нормативными документами СП 11-103-97 и СП 33-101-2003. Расчет основных гидрологических характеристик, проверка рядов на однородность и стационарность с использованием статистических критериев Стьюдента и Фишера проводилась с помощью сертифицированной программы «HydroStatCalk», разработанной в ФГБУ «Государственный гидрологический институт».

Для определения значений основных гидрологических характеристик (расход и уровень воды) строились эмпирические или аналитические кривые. Для рядов расходов и уровней воды было использовано трехпараметрическое гамма-распределение, параметры которого были определены методом наибольшего правдоподобия или методом моментов.

1.3. Характеристика основных элементов водного баланса Чебоксарского водохранилища

Чебоксарское водохранилище является долинным водохранилищем и пятой ступенью волжского каскада (см. рис. 1.2). Создано в 1980 г. путем перекрытия р. Волги у г. Новочебоксарска. В 1981 г. водохранилище было заполнено до промежуточной отметки 63.0 м БС (вместо проектной 68.0 м БС), и до настоящего времени его эксплуатация осуществляется в условиях незавершенного строительства (Кривошей, 2003, 2011; Родионов и др., 2022).

Бассейн водохранилища располагается в юго-восточной подобласти атлантико-континентальной лесной области в зоне достаточной увлажненности. От г. Городца до устья р. Оки водохранилище расположено на Балахнинской равнине и имеет относительно симметричные берега. Ниже устья Оки правый берег высокий и крутой (высотой до 100 м), а левый низкий. Крупнейшим притоком водохранилища является р. Ока.

Чебоксарское водохранилище характеризуется наибольшей боковой приточностью и самыми высокими значениями коэффициента водообмена среди водохранилищ средней Волги и всего волжского каскада. Водообмен в водохранилище происходит от 15.6 раза в маловодные до 24.3 раза — в многоводные годы, т. е. смена воды в водоеме происходит в среднем за 15–24 суток.

Основные показатели Чебоксарского водохранилища при трех разных отметках нормального

Таблица 1.2. Показатели Чебоксарского водохранилища

Table 1.2. Indicators of the Cheboksary reservoir

Показатель	Значение при отметке НПУ		
	68.0 м БС	65.0 м БС	63.0 м БС
Площадь зеркала, км ²	2190	1510	1110
Объем водохранилища, млн м ³	12.9	7.5	4.6
Объем полезный, млн м ³	5.6	2.7	0
Длина водохранилища, км	341	310	280
Ширина водохранилища, км:			
средняя	6.4	4.9	4.0
максимальная	16	16	15
Протяженность береговой линии, км	3102	2700	2431
Глубина водохранилища, м:			
средняя	5.9	4.8	4.1
максимальная	34	27	24
Санитарный попуск, %	19	20	
тыс. м ³	1100	1000	700
Площадь переработки берегов, км ²	68	40	25

подпорного уровня воды (НПУ водохранилища) приведены в табл. 1.2.

В результате потепления климата, которое проявилось в бассейне Волги с конца 70-х гг., произошли количественные и качественные изменения составляющих водного баланса водохранилища (Алексеевский и др., 2013; Георгиевский и др., 2015). Наибольшие изменения за этот период в водном балансе коснулись бокового притока, который выржен значимым отрицательным трендом.

Боковой приток в Чебоксарское водохранилище формируется в основном в бассейнах трех больших рек – Оки, Суры и Ветлуги. Гидрометрические створы на этих реках освещают 86% площади водосбора. Общая освещенность измерениями расходов с учетом створов на малых реках составляет 92%. Самую большую площадь водосбора имеет бассейн р. Оки, 244 000 км², а самую малую площадь водосбора из рек – притоков, привлеченных к расчету бокового притока, – р. Юронга, 674 км².

Уменьшение годового бокового притока к водохранилищу за маловодный период 2007–2018 гг. составило 12% по сравнению с многоводным 1993–2006 гг. В период весеннего половодья, в апреле – мае приток уменьшился соответственно на 18 и 20%. Летне-осенний приток воды к водохранилищу также уменьшился. Зимой сток увеличился, в январе на 23%, в феврале на 6%, в марте на 7% (см. рис. 1.3).

Таким образом, из-за климатических изменений произошло внутригодовое перераспределение бокового притока Чебоксарского водохранилища.

Годовой сток воды за 1982–2022 гг. через плотину Чебоксарской ГЭС имеет значимый отрицательный тренд со средним градиентом 3.16 км³/10 лет.

Для оценки межгодовой изменчивости стока Верхней Волги у г. Чебоксары были использованы материалы гидрологических наблюдений за среднегодовым расходом воды на трех гидропостах Росгидромета за период с 1877 по 2022 г.: с 1877 по 1980 г. в створе р. Волга – г. Горький, с 1946 по 1956 г., р. Волга – г. Чебоксары, а после завершения заполнения Чебоксарского вдхр. с 1981 по 2022 г. данные створа р. Волга – Чебоксарская ГЭС (нижний бьеф).

Для восстановления рядов среднегодовых расходов воды у г. Чебоксары за 1877–1945 и 1957–1980 гг. гидропост р. Волга – г. Горький был взят в качестве поста-аналога. Восстановленный хронологический график годовых расходов воды у г. Чебоксары за 1877–2022 гг. приводится на рис. 1.4, где прослеживается последовательное чередование периодов различной водности.

Период 1 – с 1877 по 1889 г. характеризуется повышенной водностью со среднегодовым расходом 3890 м³/с. Во 2-м периоде с 1890 по 1929 г. водность реки была на уровне средней (3470 м³/с).

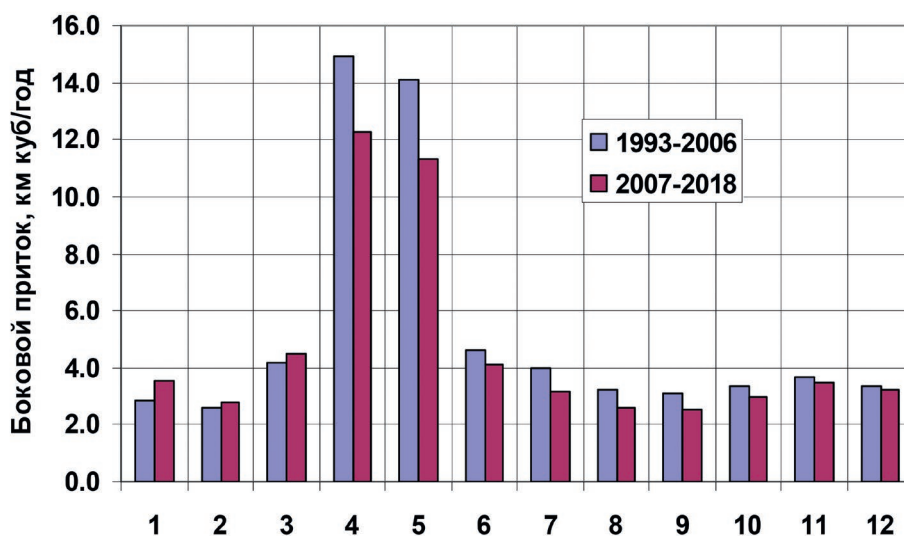


Рис. 1.3. Внутригодовой ход бокового притока к Чебоксарскому водохранилищу по месяцам (км³) за 1993–2006 и 2007–2018 гг.

Fig. 1.3. Annual course of lateral inflow to Cheboksary reservoir by month (km³) for 1993–2006 and 2007–2018

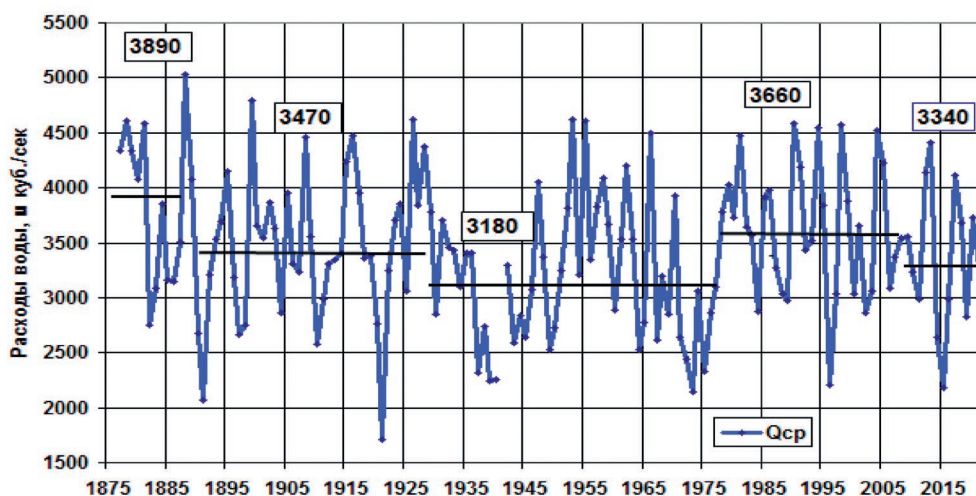


Рис. 1.4. Хронологический ход среднегодового расхода воды в створе г. Чебоксары за 1877–2022 гг.

Fig. 1.4. Chronological course of average annual water consumption in the alignment of Cheboksary for 1877–2022

Затяжным маловодьем отмечен третий период с 1930 по 1977 г. (3180 м³/с). В дальнейшем климатические изменения привели к росту годового стока с фазой более повышенной водности 1978–2005 гг. с расходом 3660 м³/с (период 4).

После 1978 г. наблюдается рост среднегодовой температуры 0.53 °С/10 лет, что привело к увеличению ее в сравнении с серединой XX в. на 1.2–1.4 °С. Эти изменения оказали значительное воздействие на факторы формирования стока как в целом за год, так и в масштабах гидрологических сезонов (Болгов и др., 2013).

С 2006 г. началась маловодная фаза, которая продолжается до настоящего времени (период 5). Средне-

годовой расход последней фазы составляет 3340 м³/с. Аналогичные периоды водности ранее были отмечены для участка Нижней Волги в районе г. Волгограда.

Внутри выделенных периодов режим водности Волги характеризуется чередованием лет с пониженным, средним и повышенным объемом стока. Последствия длительного маловодья в 30-е гг. привели к строительству на Нижней Волге водохранилищ Волго-Камского каскада.

Маловодье в 1970-х гг. и связанное с ним снижение до критических отметок уровня Каспия стали основанием для развертывания проектных работ по межбассейновым переброскам стока (Шикломанов и др., 2008).

По интенсивности воздействия результатов строительства и заполнения Чебоксарского водохранилища на сток р. Волги можно выделить два качественно различных периода — это период условно естественного стока 1877–1980 гг. и зарегулированного стока (являющегося сбросом в нижний бьеф гидроузла) 1981–2022 гг. Средние годовые расходы за период условно естественного (1877–1980) и зарегулированного (1981–2022) стока близки и составляют соответственно 3400 и 3520 м³/с.

Для периода условно естественного стока (1877–1980 гг.) характерна большая его изменчивость со стандартным отклонением от среднего — 690 м³/с. В период зарегулированного стока (1981–2022 гг.) стандартное отклонение равно 634 м³/с. Амплитуда колебания между максимальным и минимальным среднегодовым расходом за 1877–1980 гг. составила 3320 м³/с, после зарегулирования она снизилась до 2400 м³/с.

В период условно естественного стока различают ненарушенный, слабонарушенный и сильно нарушенный сток (Шикломанов и др., 2008; Коронкевич и др., 2010). Период с 1877 по 1936 г. принято считать периодом ненарушенного стока р. Волги, средний объем годового стока у г. Чебоксары в этот период равен 3540 м³/с при стандартном отклонении 662 м³/с.

Время с 1937 по 1980 г. связано с началом строительства гидроузлов и заполнения каскада водохранилищ и является периодом слабонарушенного стока. Средний годовой расход в этот период составил 3200 м³/с ($s = 685$ м³/с). С 1937 по 1958 г. были заполнены Ивановское, Угличское, Верхневолжское и Рыбинское водохранилища, а наполнение Чебоксарского водохранилища началось в 1980 г.

В гидрологическом режиме р. Волги у г. Чебоксары период с 1981 г. по настоящее время является периодом зарегулированного стока, регулирование которого осуществляется в соответствии с Временными основными правилами использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища (РВ — 249-82, 1982).

Сток воды р. Волги ниже Чебоксарского водохранилища определяется сбросом воды через плотину, водослив и шлюз Чебоксарской ГЭС и зависит от гидрологического режима р. Волги, который регулируется диспетчерским графиком работы всего каскада Волжско-Камских водохранилищ. Средний за 1981–2022 гг. объем стока через Чебоксарский гидроузел составил 111 км³/год, или 3520 м³/с при стандартном отклонении 634 м³/с.

Потепление климата, происходящее в бассейне р. Волги в течение последних десятилетий, выражается не только ростом амплитуды колебаний и изменением годовых и сезонных значений речного стока, а также изменением характера внутригодового перераспределения стока (Шикломанов и др., 2008; Коронкевич и др., 2010).

Межгодовая изменчивость среднегодового расхода воды после ввода в эксплуатацию Чебоксарской ГЭС свидетельствует о последовательном чередовании периодов различной водности. Можно выделить два периода водности р. Волги в районе г. Чебоксары после строительства Чебоксарской ГЭС: период с 1981 по 2005 г. с расходом 3630 м³/с и маловодье 2006–2022 гг. со среднегодовым расходом 3340 м³/с.

Максимальные среднегодовые величины стока за указанные периоды были отмечены в 2004 и 2013 гг. и составили соответственно 143 и 139 км³/год, или 4520 и 4410 м³/сек. Минимальный среднегодовой сток приурочен к 1996 г. — 69.6 км³/год (2200 м³/с) и 2015 г. — 68.7 км³/год (2180 м³/с).

Минимальный попуск в нижний бьеф Нижегородского гидроузла в современных условиях составляет: 880–890 м³/с — в период летне-осенней межени и 500 м³/с — зимой. Минимальный среднесуточный расход воды в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла — 700 м³/с. При снижении суммарного притока к Чебоксарскому гидроузлу до 700 м³/с недельное регулирование мощности Чебоксарской ГЭС не проводится.

В последние годы наметилась тенденция снижения наибольших расходов воды в период весеннего половодья из-за увеличения зимних расходов, что связано с внутригодовым перераспределением стока из-за потепления климата. За период 1993–2005 гг. средний сток воды в половодье (апрель — июнь) составил 52.9 км³, за 2006–2018 — 44.1 км³. Анализ зимних попусков воды за последние годы показывает, что ее сбрасывается более чем на 20% больше, чем за период 1981–2006 гг.

Анализ хода минимального среднемесячного стока воды в створе Чебоксарской ГЭС за 1993–2018 гг. свидетельствует, что в рассматриваемый временной период климатические изменения в регионе привели к увеличению минимального месячного стока воды в зимний межнавигационный период и его уменьшению в период открытого русла. Значимые положительные тренды месячного стока через плотину ГЭС за период 1993–2018 гг. отмечены за январь, февраль и декабрь. Отрицательные тренды фиксируются в период половодья (апрель — май) и летне-осеннюю межень, кроме ноября.

1.4. Режим уровня воды

Колебание уровня воды в р. Волге ниже Чебоксарского гидроузла полностью определяется режимом попусков из Чебоксарского водохранилища. Годовой ход уровня воды характеризуется резко выраженным весенним половодьем, при котором наблюдаются наивысшие годовые уровни воды. После прохождения весеннего половодья устанавливается устойчивая летне-осенняя межень с недельными колебаниями уровня в пределах $0.5 \div 1.0$ м, связанными с изменениями нагрузок в потреблении электроэнергии, в отдельные годы межень прерывается более высоким подъемом уровня вследствие прохождения дождевых паводков.

Зимняя межень, как правило, несколько выше летне-осенней, а амплитуда колебаний уровня воды вследствие недельного регулирования стока достигает $1.0 \div 1.5$ м. В отдельные годы, в результате предполоводной сработки вышерасположенных водохранилищ, наблюдается значительный подъем уровня воды в марте — начале апреля.

С удалением от створа плотины Чебоксарского гидроузла амплитуда колебания уровня воды вследствие недельного и суточного регулирования стока снижается.

Максимальный уровень весеннего половодья наблюдается в конце первой декады мая. В отдельные годы годовые максимумы уровня воды могут быть связаны с режимом работы вышерасположенных водохранилищ и наполнением Куйбышевского водохранилища и наблюдаются не только в весен-

нее половодье, так, например, в 1976 г. высший за год уровень воды наблюдался в начале сентября.

Минимальный уровень зимнего периода наблюдается преимущественно в конце марта и в среднем составляет 48.7 м БС. Первые ледовые явления на рассматриваемом участке р. Волги отмечаются обычно в конце первой декады ноября. Осенний ледоход начинается практически сразу же, в начале второй декады ноября. Средняя продолжительность осеннего ледохода составляет 10–15 дней.

На рис. 1.5 показан годовой ход уровня воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС за маловодные 2010, 2015 и 2020 гг.

Максимальная амплитуда колебания уровня была отмечена в многоводный 1981 г. и составила 840 см, а минимальная — 146 см в маловодный 2015 г. Величина средней амплитуды уровня за маловодный период 2006–2022 гг. снизилась по сравнению с предшествующим периодом более чем на 130 см.

Хронологический ход максимального и минимального годового уровня воды за навигационный период в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС на весь период эксплуатации 1981–2022 гг. показал, что среднее максимальное значение уровня маловодья 2006–2022 гг. (55.5 м БС) оказалось на 1.2 м ниже по сравнению с периодом 1981–2005 гг. (56.7 м БС), что связано с внутригодовым перераспределением стока в сторону увеличения меженного стока за счет снижения весеннего стока, что вызвано потеплением климата.

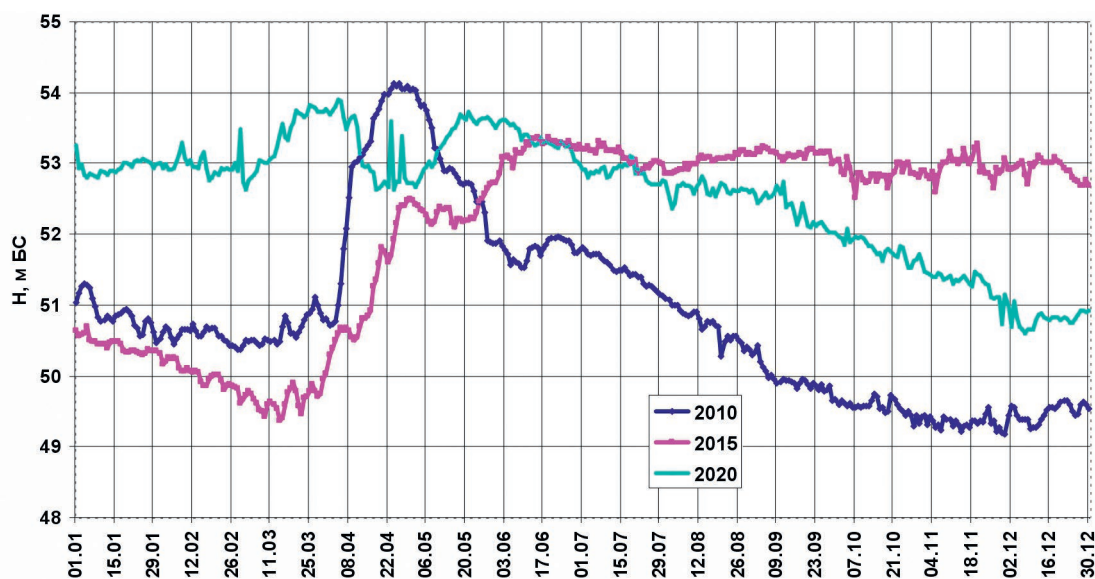


Рис. 1.5. Годовой ход уровня в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС за маловодные 2010, 2015 и 2020 гг.

Fig. 1.5. Annual progress of the level in the downstream of the Cheboksary hydroelectric station for low-water 2010, 2015 and 2020

В свою очередь, средний минимальный навигационный уровень за период маловодья 2006–2022 гг. оказался несколько выше (51.2 м БС), чем за предшествующие 1981–2005 гг. (51.0 м БС). Однако в последние годы наметился выраженный понижательный тренд уровня при общем положительном тренде за весь период наблюдений.

Графики изменения суточного уровня воды за маловодные 1995 и 2010 гг. на г/п р. Волга – нижний бьеф Чебоксарской ГЭС и г/п р. Волга – с. Козловка, который находится в 70 км ниже створа гидроузла, даны на рис. 1.6 и 1.7.

Наибольшая суточная амплитуда колебания уровня между постами отмечается в период поло-

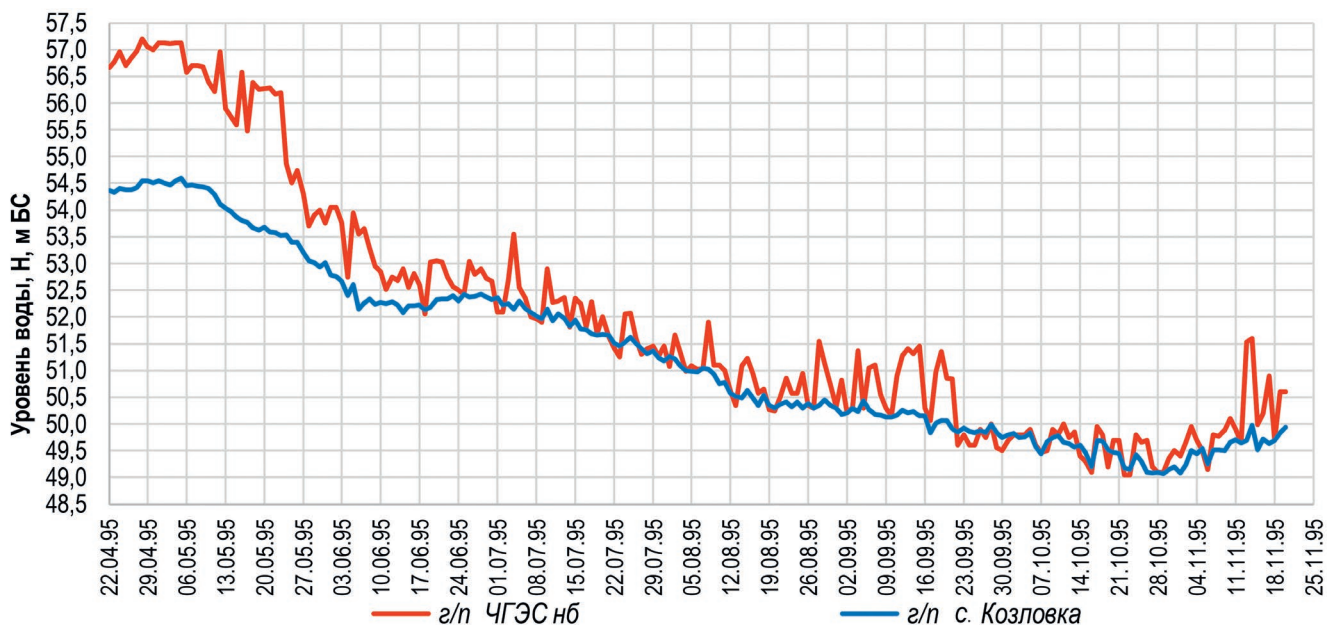


Рис. 1.6. Годовой ход уровня в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на г/п р. Волга – с. Козловка за маловодный 1995 г.

Fig. 1.6. Annual course of the level in the downstream of the Cheboksary hydroelectric station and the Volga river town – s. Kozlovka for low-water 1995

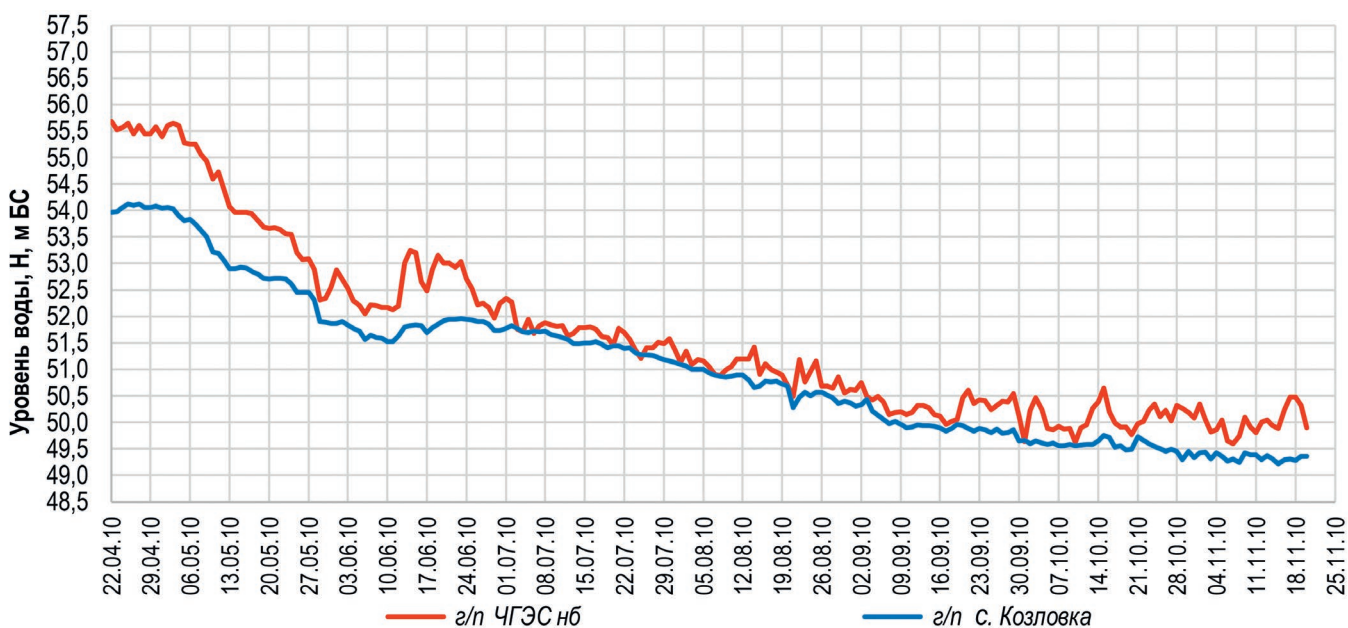


Рис. 1.7. Годовой ход уровня в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на г/п р. Волга – с. Козловка за маловодный 2010 г.

Fig. 1.7. Annual course of the level in the downstream of the Cheboksary hydroelectric station and the Volga river town – s. Kozlovka for low-water 2010

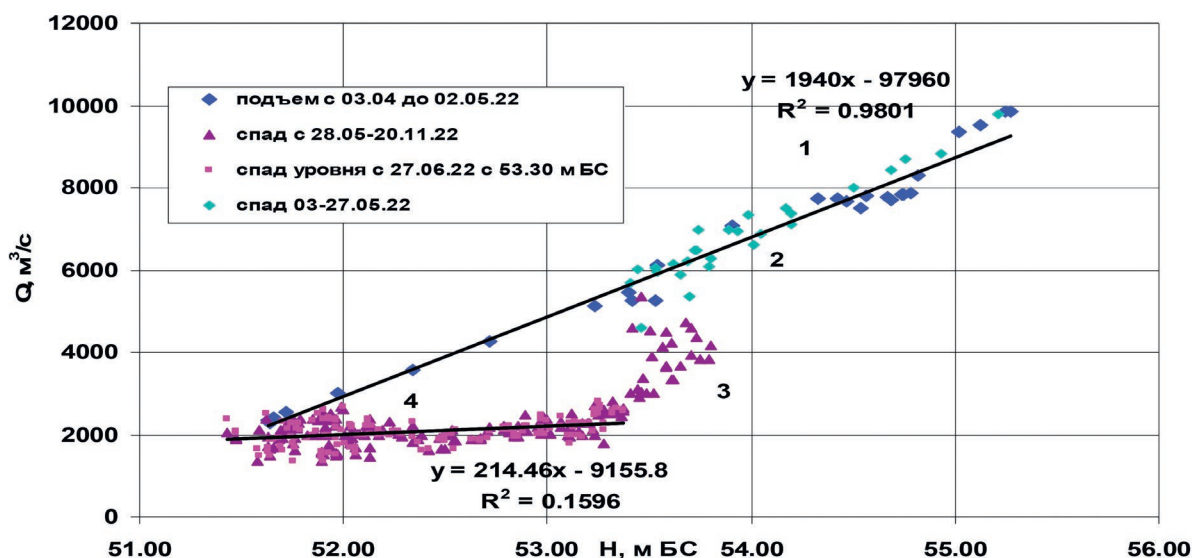


Рис. 1.8. Кривые связи $Q(H)$ для нижнего бьефа Чебоксарской ГЭС за 2022 г.

Fig. 1.8. Coupling curves $Q(H)$ for the lower shelf of the Cheboksary HPP for 2022

водья: в 1995 г., превышая 400 см, и в 2015 г. — до 150 см. На спаде половодья и в меженный период разница в уровнях не более 100 см, не считая редких дождевых паводков.

Наименьший годовой уровень воды в створе г/п р. Волга — с. Козловка за маловодный период 2008–2021 отмечен в маловодный 2010 г. — 48.99 м БС и в 2015 г. — 49.2 м БС.

Анализ совмещенных хронологических графиков минимального уровня воды за навигационный период 1982–2022 гг. в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и на г/п р. Волга — с. Козловка свидетельствует о синхронности их колебаний. В маловодье конца 2000-х гг. отмечен незначительный тренд на понижение минимального уровня воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС.

На рис. 1.8 представлена кривая связи расхода с уровнем воды $Q(H)$ для нижнего бьефа Чебоксарской ГЭС, полученная по данным измерений в 2022 г.

Отсутствие четкой линейной связи расхода с уровнем воды связано с влиянием суточного регулирования сбросов на Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах.

Расчитанные максимальные и минимальные значения обеспеченного уровня воды за различные периоды водности приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Для количественной оценки зависимости ежедневного уровня воды в навигационный период между створом НБ Чебоксарской ГЭС и г/п р. Волга — с. Козловка были использованы суточные уровни воды за маловодные 1995 и 2010, 2013 и 2015 гг.

Характеристики корреляционно-регрессионного анализа, включая тесноту связи уровней воды, которая определялась по рассчитанному коэффициенту корреляции, выполнены с помощью программы STATISTICA 10 RU (табл. 1.5, рис. 1.9). Связь

Таблица 1.3. Максимальные значения обеспеченного уровня за различные периоды водности 1981–2022 гг.

Table 1.3. Maximum secured levels for various water periods 1981–2022

Период	Средний макс. за многолетний период уровень воды, м БС	Принятые значения		Максимальные значения уровня воды различной обеспеченности, м БС					
		Cv	Cs/Cv	обеспеченность, %					
				0.1	1	5	10	20	25
р. Волга — нижний бьеф Чебоксарской ГЭС, ПУ = 50.0 м БС									
1981–2021	56.2	0.03	–5.32	60.3	59.4	58.5	58.0	57.4	57.2
1981–2005	56.7	0.02	–21.42	59.9	59.3	57.7	58.3	57.8	57.7
2006–2022	55.5	0.05	2.12	62.0	60.3	58.8	58.0	57.1	56.8

Таблица 1.4. Минимальные значения обеспеченного уровня навигационного периода за различные периоды водности 1981–2022 гг.**Table 1.4.** Minimum secured levels of navigation period for various periods of water content 1981–2022

Период	Средний мин. за многолетний период уровень воды, м БС	Принятые значения		Минимальные значения уровня воды различной обеспеченности за период навигации, м БС					
		C _v	C _s /C _v	обеспеченность, %					
				75	80	90	95	99	99.5
р. Волга – нижний бьеф Чебоксарской ГЭС, ПУ = 50.0 м БС									
1981–2021	51.1	0.02	–0.42	50.6	50.4	50.0	49.7	49.3	49.0
1981–2005	51.0	0.02	–0.23	50.4	50.3	49.9	49.5	48.9	48.6
2006–2022	51.2	0.01	–0.61	50.8	50.6	50.2	49.9	49.2	48.9
р. Волга – с. Козловка, ПУ = 49.0 м БС									
1981–2021	51.0	0.02	–0.40	50.4	50.3	49.9	49.5	48.8	48.5
1981–2005	50.9	0.02	–2.83	50.3	50.1	49.7	49.3	48.6	48.4
2006–2022	51.0	0.01	–31.87	50.5	50.4	50.0	49.7	49.1	48.8

Примечание: жирным шрифтом выделены минимальные значения обеспеченного уровня воды, которые ниже проектных значений уровня, установленных для условий безопасного судоходства на исследуемых участках Нижней Волги.

Таблица 1.5. Характеристики корреляционно-регрессионного анализа навигационных уровней воды, нижний бьеф Чебоксарской ГЭС – г/п с. Козловка**Table 1.5.** Characteristics of correlation and regression analysis of navigational water levels, downstream of Cheboksary HPP – Kozlovka settlement

Период наблюдений	Число пар значений	Уравнение регрессии	Средняя ошибка уравнения регрессии, м	Коэффициент корреляции, R ²
1995	213	$y = 0.682x + 15.865$	0.4028	0.9404
2010	213	$y = 0.8122x + 9.1119$	0.2968	0.9541
2013	213	$y = 0.3515x + 34.158$	0.2835	0.7579
2015	213	$y = 0.0039x^2 - 0.0728x + 45.7$	0.2534	0.8352
1995, 2010, 2013 и 2015	852	$y = 0.0071x^4 - 1.5182x^3 + 121.13x^2 - 4287.9x + 56\ 869$	0.2402	0.9271

уровней между постами составляет 0.76–0.95, т. е. является высокой.

Совмещенный график связи за рассматриваемые годы свидетельствует о высокой тесноте связи между значениями уровня воды. Коэффициент корреляции ежедневных уровней воды за навигацию за все годы в створах г/п нижний бьеф Чебоксарской ГЭС – г/п Козловка составил 0.9271, средняя ошибка уравнения регрессии ± 24 см.

Наименьший уровень воды на обоих гидропостах был отмечен в маловодные 1995 и 2010 гг., с падением почти до отметки 49.00–49.50 м БС. В более многоводные годы однозначной связи

уровней между постами не наблюдается из-за того, что они расположены на зарегулированном участке Куйбышевского водохранилища, где велико влияние суточного регулирования Чебоксарской и Самарской ГЭС.

1.5. Режим скоростей течения и анализ параметров твердого стока в условиях неустановившегося движения воды в нижнем бьефе гидроузла

Для анализа гидрологических характеристик потока были обработаны данные наблюдений за уровнем воды и сбросным расходом воды по Че-

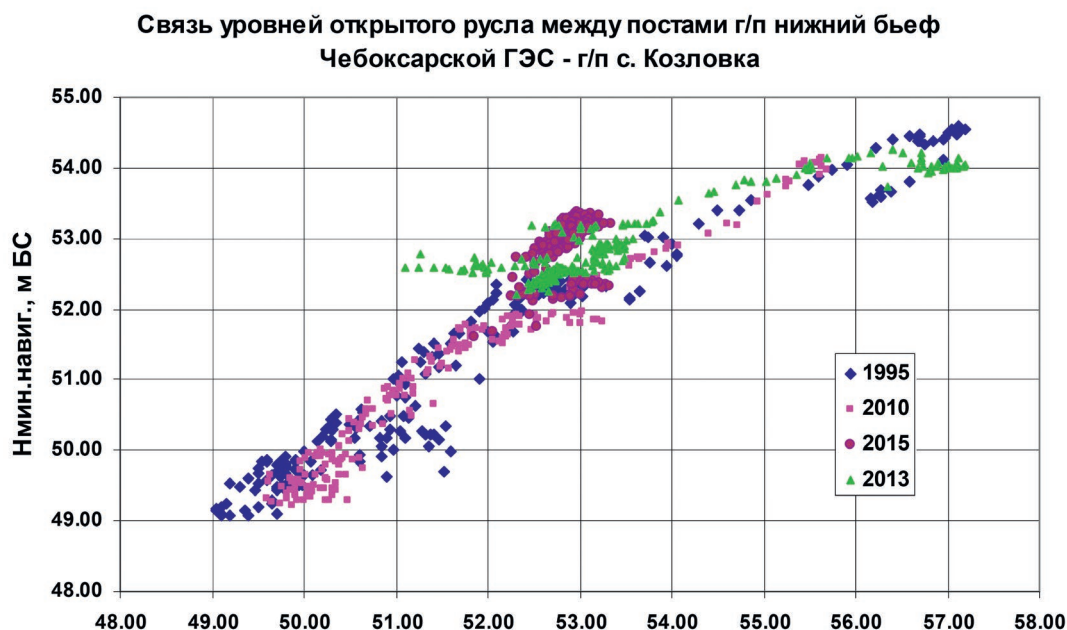


Рис. 1.9. График связи ежедневных навигационных уровней воды между створами постов г/п нижний бьеф Чебоксарской ГЭС – г/п Козловка по данным наблюдений за 1995, 2010, 2013 и 2015 гг.

Fig. 1.9. Schedule of daily navigational water levels between the gates of the posts of the lower basin of the Cheboksary hydroelectric power station – Kozlovka settlement according to the observations of 1995, 2010, 2013 and 2015

боксарской ГЭС за навигацию 2022 г. Полученные результаты представлены графически на рис. 1.10 в виде совмещенных хронологических графиков сбросных среднесуточных расходов и уровней воды в нижнем бьефе гидроузла.

Анализ материалов наблюдений за среднесуточным уровнем и расходом воды, переданных филиалом ПАО «РусГидро» – «Чебоксарская ГЭС», позволяет сформулировать следующие выводы.

Перед началом весеннего половодья в 2022 г. минимальный сбросной расход воды в нижний бьеф Чебоксарской ГЭС наблюдался 6 апреля. Его величина составила $2280 \text{ м}^3/\text{с}$ при уровне воды в верхнем бьефе, равном 62.9 м БС .

В нижнем бьефе отметка уровня воды на этот момент была равной 51.64 м БС .

В последующие дни до 17 апреля началось резкое увеличение сброса воды через гидроузел. Расход воды на эту дату увеличился до $7750 \text{ м}^3/\text{с}$. В верхнем бьефе к этому времени установилась минимальная отметка уровня воды, равная 62.64 м БС , а в нижнем бьефе уровень воды повысился до отметки 54.33 м БС .

Далее, в течение последующих десяти дней, до 26–27 апреля, интенсивность увеличения сбросного расхода воды в нижний бьеф несколько снижается.

При этом уровень воды в верхнем бьефе гидроузла возрастает, и к этому моменту достигает максимальной годовой отметки, равной 63.29 м БС при расходе воды $8290 \text{ м}^3/\text{с}$.

В нижнем бьефе гидроузла отметка уровня воды на эту дату составила 54.82 м БС .

Затем до 30 апреля наблюдается еще одна краткосрочная фаза увеличения сбросного расхода воды. На эту дату было установлено самое большое годовое значение расхода, равное $9860 \text{ м}^3/\text{с}$. В верхнем и нижнем бьефах гидроузла установились максимальные годовые значения уровня воды, равные соответственно 63.29 м БС и 55.27 м БС .

Уровень воды в створе поста Козловка на пике половодья был зафиксирован на отметке 53.6 м БС , а в верхнем бьефе Куйбышевского гидроузла на отметке 51.32 м БС .

Таким образом, на пике весеннего половодья на приплотинном участке, от створа Чебоксарского гидроузла до гидрологического поста Козловка наблюдаются максимальные значения сбросного расхода и наибольшее падение уровня воды. При этом средний уклон свободной поверхности на данном участке оказался достаточно небольшим и составил около 2.8 см/км . На нижерасположенном участке, от Козловки до створа Самарского гидроузла, его значение в половодье оказалось еще меньше, порядка 0.5 см/км .

После достижения максимальных паводковых значений расхода воды в период до 10 мая 2022 г. происходило интенсивное уменьшение сброса воды в нижний бьеф Чебоксарского гидроузла.

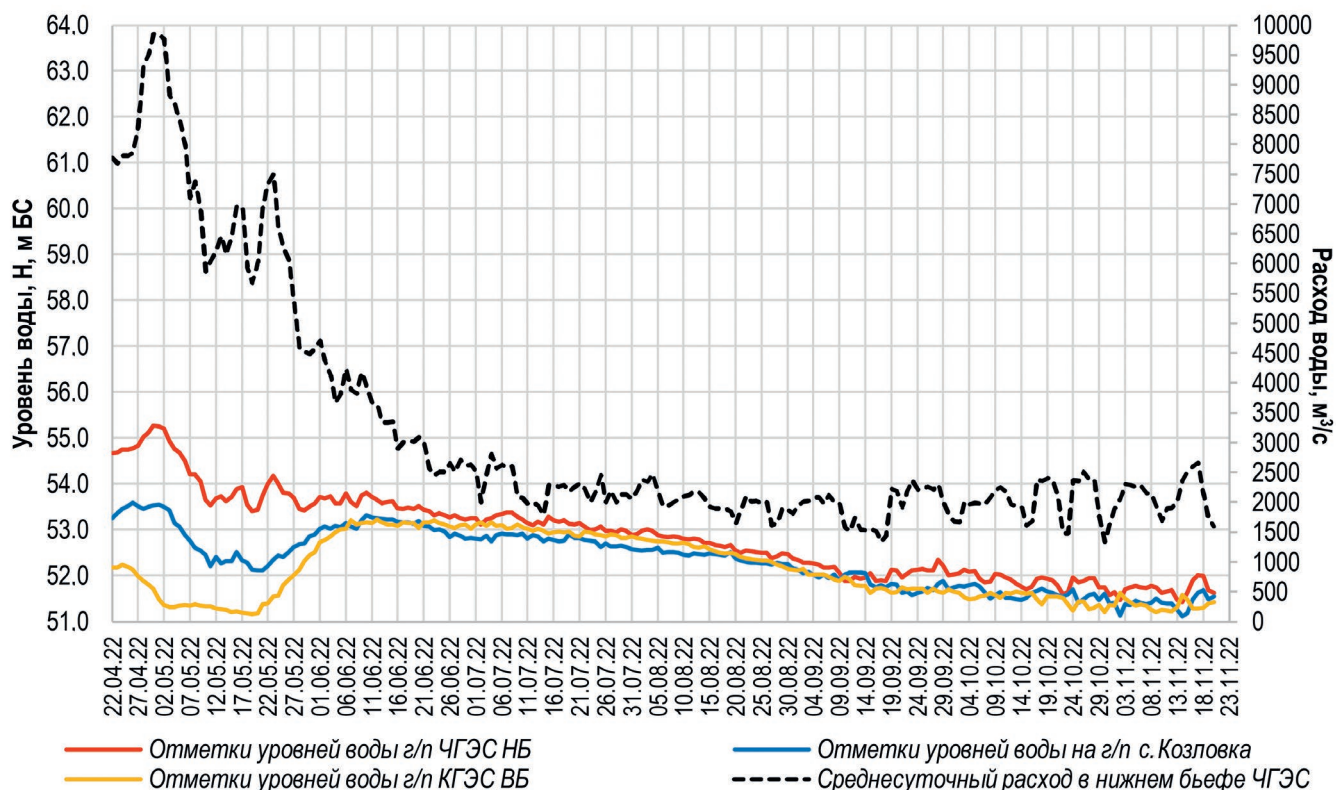


Рис. 1.10. Хронологические графики сбросного среднесуточного расхода и уровня воды в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла за навигационный период 2022 г.

Fig. 1.10. Chronological graphs of discharge average daily flow rates and water levels in the downstream of the Cheboksary hydroelectric complex for navigation period 2022

Среднесуточный расход воды на эту дату составил $5870 \text{ м}^3/\text{с}$, а уровень воды в верхнем бьефе гидроузла поддерживался практически на постоянной отметке, равной 63.2 м БС. К этому времени в нижнем бьефе ГЭС установился уровень воды, равный 53.65 м БС, и закончилось интенсивное понижение уровня воды в створе поста Козловка. Наполнение Куйбышевского водохранилища в этот период еще не начиналось.

В последующие 10–12 дней сброс воды из Чебоксарского водохранилища поддерживался в среднем около величины $6500 \text{ м}^3/\text{с}$. В верхнем бьефе Самарского гидроузла 21 мая была достигнута минимальная отметка уровня воды, равная 52.11 м БС, и с этого момента до 12 июня было осуществлено наполнение Куйбышевского водохранилища до максимальной годовой отметки, равной 53.23 м БС. В результате распространения подпора от створа гидроузла вверх по реке отметки свободной поверхности выровнялись по длине водохранилища. В створе поста Козловка уровень воды на эту дату составил 53.26 м БС.

Таким образом, наиболее значительных переформирований в русле р. Волги в нижнем бьефе

Чебоксарского гидроузла следует ожидать в период пропуска весеннего половодья до того момента, пока не началось наполнение Куйбышевского водохранилища. При этом на приплотинном участке наблюдаются наибольшие значения сбросного расхода воды. Однако вследствие подпора со стороны Куйбышевского водохранилища уклоны свободной поверхности в половодье остаются относительно небольшими и уменьшаются в последующем, по мере его наполнения.

После пропуска весеннего половодья определяющим фактором русловых переформирований в нижнем бьефе гидроузла становится суточный режим регулирования стока воды.

Кинематическая структура потока и динамика морфологических изменений в нижнем бьефе гидроузла (Гришанин, 1979; Muste et al., 2020; Агеев, 2021) в условиях недельного и суточного регулирования стока представляют собой сложную картину. В нижнем бьефе отсутствует однозначная связь между расходом и уровнем воды. При прохождении волны попуска максимумы скорости течения воды и максимум наступления уровня воды не совпадают по времени, последний наступает позже.

Волна попуска расплывается по мере своего распространения от створа гидроузла вниз по течению реки. Величина попускового расхода воды по длине реки уменьшается. Аналогично уменьшается и высота волны попуска. При этом эпюра распределения скорости течения воды по вертикали трансформируется при прохождении волны попуска, а максимум скорости смещается в направлении дна потока. Наиболее сильно это проявляется в непосредственной близости от гидроузла.

Особенности гидравлики потока обуславливают сложный характер русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов. Наряду с фоновыми эрозийными процессами, происходящими ниже створа гидроузла, при прохождении волны попуска в русле реки с деформируемым дном наблюдается транспорт донных наносов в виде донных гряд и происходят знакопеременные деформации дна и берегов. Прогноз русловых переформирований в данных условиях и оценка устойчивости дноуглубительных прорезей представляют собой сложную задачу.

Учитывая актуальность данной проблемы для судоходства, был проведен ряд исследований, посвященных изучению гидравлики потока и параметров транспорта наносов в нижних бьефах Нижне-Свирского гидроузла на р. Свирь, Волгоградского и Нижегородского (Гладков и др., 2023) гидроузлов на р. Волге. В ходе исследований на основании данных почасовых наблюдений за расходом и уровнем воды в нижних бьефах указанных гидроузлов были проведены численные эксперименты для оценки скоростного режима потока и параметров транспорта наносов.

Полученные результаты показали, что условия транспорта наносов в нижних бьефах изменяются в зависимости от величины сбросного расхода воды. В течение всего периода весеннего половодья скорость течения превышает значения неразмывающей скорости, что свидетельствует о возможности активного транспорта наносов и русловых деформаций на данном участке реки.

В меженно-осенний и осенне-зимний периоды навигации сбросный расход воды через створы гидроузлов уменьшается, а амплитуда его суточного колебания определяется режимом регулирования стока. Скорость течения на судовом ходу изменяется в значительных пределах и превышает величину неразмывающей скорости течения лишь в моменты прохождения пиков суточных попусков воды из верхнего бьефа. Отсюда следует, что движение наносов в нижних бьефах имеет эпизодический характер. При этом частицы грунта на дне потока приходят в движение в течение ограниченного периода времени, отвечающего моментам попусков,

а все остальное время в течение суток донные частицы находятся в состоянии покоя.

Гидроморфологический режим реки предопределяет условия транспорта наносов и русловых переформирований. При неустановившемся движении воды, обусловленном суточным регулированием речного стока, происходит активизация транспорта наносов. При этом в связи с незначительной амплитудой суточного колебания уровня воды при распространении волны попуска вниз по течению реки, а также вследствие инерционности процесса переформирования донных гряд не ожидается значительного изменения их размеров (высоты и длины) по сравнению со стационарным режимом стока.

В свою очередь, такие параметры твердого стока, как скорость движения гряд и расход наносов, в этих условиях изменяются существенно. Как показали проведенные численные эксперименты, средняя величина расхода наносов в условиях неустановившегося движения воды в меженно-осенний период оказалась в полтора раза больше, чем при установившемся режиме стока. Как показали результаты численных экспериментов (Гладков и др., 2023), в осенне-зимний период это увеличение составляет в отдельных створах до 3.5 раза по сравнению со стационарным течением при среднесуточном расходе воды. Причина такого увеличения расхода наносов связана, скорее всего, с возрастанием скорости перемещения гряд в моменты прохождения волны суточных попусков воды.

В связи с отсутствием сведений о почасовом расходе и уровне воды для Чебоксарского гидроузла такую оценку для рассматриваемого участка р. Волги в рамках настоящей работы выполнить не удалось. При этом на верховом участке Куйбышевского водохранилища в силу специфики гидроморфологического режима следует ожидать сходной картины проявления русловых деформаций при суточном регулировании стока, хотя и с меньшей интенсивностью, чем на других рассмотренных выше гидроузлах.

Оценка русловых переформирований в зоне влияния карьерных разработок в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла будет получена ниже в ходе анализа картографических материалов и по результатам математического моделирования.

1.6. Русловой режим и судоходные условия в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла

Наиболее значительное и, как правило, необратимое воздействие на русловой режим судоходных рек оказывает строительство гидротехнических со-

оружений — плотин, возводимых на реках с целью регулирования речного стока, а также массовая добыча речного аллювия — нерудных строительных материалов (НСМ) из русловых карьеров (Гладков, Чалов, Беркович, 2023).

В результате перекрытия стока реки плотиной на участке водохранилища полностью прерывается транзит влекомых наносов. Влияние плотины сказывается на характеристиках руслового режима реки в границах от верхового участка водохранилища до самого устья реки. По длине зарегулированного участка реки — в зоне выклинивания подпора от водохранилища, в прибрежных зонах водохранилища и в нижнем бьефе плотины — русловые процессы изменяются по сравнению с бытовым состоянием русла реки. На каждом из этих участков изменения проявляются различным образом и по-разному сказываются на судоходных условиях.

В случае массовых карьерных разработок, равно как и при строительстве глухих плотин в составе подпорных гидроузлов, происходит перехват твердого стока реки. Однако, в отличие от первого случая, эти процессы в многолетнем разрезе представляют собой лишь задержку во времени части твердого стока в зоне влияния карьеров. После заполнения руслового карьера наносами, которое в реальных условиях может занимать десятки лет, транзит влекомых наносов в реке на участке карьерных разработок возобновляется. При этом, однако, исходные характеристики речного потока и русла реки не могут быть восстановлены в прежних значениях.

Степень воздействия карьерных разработок на русловый режим реки зависит от гидрологических и морфометрических характеристик потока и русла реки, размеров выемки (руслового карьера) и интенсивности ее разработки, а также от параметров естественного твердого стока. Необратимые изменения гидрологического и руслового режима судоходных рек в зоне влияния карьерных разработок на реках, как правило, затрагивают интересы всех остальных водопользователей и населения, проживающего в речных бассейнах.

На ряде судоходных рек изменения руслового режима, проявившиеся вследствие интенсивной добычи нерудных строительных материалов в прежние годы, приобрели к настоящему времени необратимый характер. Добыча руслового аллювия на судоходных реках, как правило, приводит к ухудшению судоходных условий в зоне влияния карьерных разработок.

До строительства каскада Волжско-Камских водохранилищ процессы руслоформирования на Волге во многом определялись естественной из-

менчивостью речного стока. На режиме Нижней Волги дополнительно сказывалось влияние изменения отметок уровня Каспийского моря.

На участках с относительно низкими темпами переформирования за период естественного развития русла (до 1955 г.) наблюдалась многолетняя направленная тенденция по наращиванию выпуклых и размыву вогнутых берегов излучин в пределах относительно стабильного русла. На участках интенсивных русловых переформирований активная перестройка русла (формирование новых разветвлений, спрямление излучин, перераспределение стока) совпала с периодом зарегулированного стока.

После строительства Куйбышевской ГЭС до момента ввода в эксплуатацию Чебоксарского гидроузла исследуемый участок р. Волги в районе г. Чебоксары и на вышерасположенном участке оказался в зоне переменного подпора. На таких участках, как правило, превалирует отложение наносов, поступающих с вышерасположенного участка реки.

Исследования, выполненные Волжской государственной академией водного транспорта (1990), показали, что до 1984 г. в зоне карьерных разработок происходило уменьшение емкости русла реки со средней интенсивностью около 0.7 млн м³ в год.

Впоследствии, после создания Чебоксарского гидроузла, характер русловых переформирований на данном участке изменился — преобладающими стали деформации размыва русла. За период с 1984 по 1989 г. емкость русла возрастала со средней интенсивностью около 1.5 млн м³ в год. При этом среднегодовой объем добычи речного аллювия на данном участке за данный период составлял около 0.8—0.85 млн м³.

Таким образом, после заполнения Чебоксарского водохранилища и начала эксплуатации ГЭС в нижнем бьефе начался взаимный процесс естественного приспособления между потоком и руслом в изменившихся условиях взаимодействия сбросного расхода воды и деформируемого русла реки. В первоначальный период это нашло выражение в увеличении скорости горизонтальных и вертикальных деформаций на перекатах. В дальнейшем темпы деформаций начали снижаться, что в целом благоприятно сказалось на сезонных деформациях перекатов и условиях судоходства в нижнем бьефе гидроузла.

Характер и интенсивность русловых деформаций на исследуемом участке р. Волги в районе планируемых карьерных разработок определяются регулирующим воздействием вышерасположенного каскада водохранилищ. В целом на данном участке

Таблица 1.6. Средние значения глубин на судовом ходу на участке судового хода с 1185.0 км по 1257.0 км по данным карт внутренних водных путей

Table 1.6. Average depths at sea in the sea passage section from 1185.0 km to 1257.0 km according to inland waterway maps

Год выпуска карты	1968	1977	2006	2022
Средняя глубина на судовом ходу, м	8.74	8.91	10.19	10.36

реки изменился характер внутригодового распределения стока воды, снизился максимальный расход воды, уменьшился объем стока взвешенных наносов и произошел полный перехват стока влекомых наносов.

Расположенный в нижнем бьефе гидроузла приплотинный участок Чебоксарской ГЭС находится в зоне переменного подпора со стороны Куйбышевского водохранилища. При прохождении паводкового сбросного расхода воды через створ гидроузла в начальные моменты наполнения Куйбышевского водохранилища возможны активные переформирования русла реки в приплотинной зоне. При этом материал от размыва поступает на нижерасположенные перекаты, что приводит к повышению отметок их гребней в половодье. Кроме этого, суточные колебания расхода воды в меженные периоды также приводят к интенсификации эрозионных процессов в нижнем бьефе гидроузла.

Затруднения для судоходства в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла обусловлены также и горизонтальными деформациями русла. Гидравлические характеристики речного потока на исследуемом участке реки в районе проектируемых русловых карьеров определяются морфологическими особенностями русла, а именно наличием ряда крупных русловых разветвлений в районе о-вов Казин – Верхний Сидельниковский, Нижний Сидельниковский, Ураковский и Криушинский.

К участкам разветвлений русла приурочены перекаты на судовом ходу – перевал Вход в Новинскую воложку, перекат Марпосадский, перекат Демешкинский, перекат Водолеевский, перекат Ураковский, перекат Кушниковский и перекат Криушинский.

Для анализа современной динамики переформирований дна в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла по данным карт внутренних водных путей за 1968, 1977, 2006 и 2022 гг. были построены продольные профили по оси судового хода. Полученные данные позволяют оценить характер и интенсивность переформирований, произошедших на стрежне потока за рассматриваемый (с 1968 г.) период.

Для анализа изменения морфометрических характеристик русла р. Волги в нижнем бьефе

гидроузла по материалам карт внутренних водных путей за разные годы были рассчитаны средние значения глубин русла реки на участке судового хода с 1185.0 по 1257.0 км. Результаты вычислений приведены в табл. 1.6.

Результаты выполненного анализа показали, что за рассматриваемый период на участке судового хода в районе г. Чебоксары происходили следующие изменения.

До ввода Чебоксарского гидроузла в эксплуатацию на данном участке р. Волги происходили ограниченные переформирования с незначительной тенденцией к увеличению глубины на судовом ходу. С 1968 по 1977 г. средняя глубина на судовом ходу увеличилась на 0.17 м, т. е. глубина возрастала со средней интенсивностью около 1.9 см в год. Добычи нерудных строительных материалов в данный период на исследуемом участке не проводилось.

За период с 1977 по 2006 г. практически по всей длине рассматриваемого участка активизировались эрозионные процессы. Средняя глубина на судовом ходу за этот период наблюдений увеличилась на 1.28 м, т. е. она возрастала со скоростью около 4.4 см в год. Определяющим фактором русловых переформирований на участке за данный период наблюдений является завершение строительства и ввод в эксплуатацию Чебоксарского гидроузла. Русловые карьеры в границах исследуемого участка р. Волги начали разрабатываться с 1989 г. (месторождение Приверх острова Казин), а также с 2003 г. (Криушинское месторождение) и с 2004 г. (Покровское и Сидельниковское месторождения).

За последний анализируемый отрезок времени – с 2006 по 2022 г. на участке наблюдались незначительные знакопеременные деформации. На верхнем 30-километровом отрезке водного пути, расположенном от створа Чебоксарского гидроузла до н.п. Ураково, наблюдалась тенденция понижения отметок дна на судовом ходу. При этом средняя глубина на судовом ходу за указанный период увеличилась на 0.17 м, т. е. она возрастала в среднем на величину около 1.1 см в год, сопоставимую с интенсивностью понижения минимального уровня воды в нижнем бьефе гидроузла за последние двадцать лет. На данном участке с 2008 г. началось освоение месторождения Ураковское.

В целом результаты выполненного анализа показали, что к настоящему времени на участке р. Волги, расположенном в приплотинной области Чебоксарской ГЭС и на нижерасположенном участке судового хода, интенсивность сезонных и многолетних русловых деформаций значительно снизилась по сравнению с предшествующим периодом наблюдений, что свидетельствует о стабилизации руслового режима реки через 40 лет с начала эксплуатации водопропускных и водосбросных сооружений гидроузла.

В связи с тем, что все разрабатываемые карьеры НСМ расположены на данном участке в непосредственной близости от кромок судового хода, с течением времени, по мере аккумуляции наносов в отработанных емкостях, возможно ожидать дальнейшего понижения отметок дна на судовом ходу со средней интенсивностью порядка 1.1 см в год. На данный момент пока не прослеживается однозначной корреляционной связи между изменением (понижением) отметок дна на судовом ходу и разработкой русловых карьеров. Скорее всего, этот эффект станет проявляться позже, с течением времени.

Определяющим фактором возможного влияния русловых карьеров на судоходные условия в данном случае следует считать потенциальную опасность дополнительного понижения уровня воды в нижнем бьефе гидроузла в маловодные годы вследствие их разработки. Оценка влияния карьеров на уровеньный режим реки была получена по результатам математического моделирования.

Строительство Волжско-Камского каскада ГЭС в значительной степени повлияло на водный режим Волги, и к настоящему времени порядок эксплуатации отдельных гидроузлов и каскада в целом определяет гидрологический режим реки.

Регулирование режима работы водохранилищ Волжско-Камского каскада на верховом участке Куйбышевского водохранилища осуществляется Федеральным агентством водных ресурсов в соответствии с «Временными основными правилами использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища на р. Волге (на период начальной эксплуатации)» (РВ — 249-82, 1982) и «Основными правилами использования водных ресурсов Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского водохранилища на р. Волге» (1983).

Минимальный навигационный уровень воды в Куйбышевском водохранилище установлен на отметке 49.0 м БС.

Куйбышевское водохранилище осуществляет суточное, недельное и годовое регулирование речного стока (Сазонов, 2015). В конце апреля —

начале мая, в средние по водности годы, уровень водохранилища достигает отметок, близких к нормальному подпорному уровню (НПУ). Обычно в середине мая в связи с «рыбным попуском» уровень сработки составляет 1.0–1.5 м.

Наполнение водохранилища до отметки нормального подпорного уровня воды, как правило, происходит в июне. В маловодные годы уровень водохранилища в течение всей навигации поддерживается на 1.0–1.5 м ниже отметки НПУ.

В навигационный период сработка водохранилища начинается обычно в конце июля — начале августа и к концу навигации составляет 1.5–1.8 м. В маловодные годы сработка водохранилища к концу навигации может составить 2.5–3.0 м, что в значительной степени сказывается на уменьшении проходной глубины на участке от Чебоксарского гидроузла до г. Казани.

В период навигации под влиянием ветров наблюдаются сгонно-нагонные явления. Наибольшие колебания отмечаются при сильных северных ветрах, при которых уровень воды на участке от с. Верхний Услон до с. Нижние Вязовые понижается на величину 0.4–0.5 м. При значительном падении уровня воды отдельные судоходные трассы закрываются для транзитного судоходства.

Скорость течения воды по длине Куйбышевского водохранилища изменяется в достаточно больших пределах и зависит от величины попусков через гидроузлы, а также от боковой и транзитной приточности (Сазонов, 2015). Во время половодья скорость течения на речной части водохранилища достигает 5.5–6.0 км/ч, в узкостях — 6.5 км/ч. В период «провальных» уровней воды скорость течения уменьшается и составляет на приплотинном участке 0.3–0.4 км/ч, в узкостях 1.5–2.0 км/ч. На приплотинном участке скорость течения в суточном диапазоне изменяется в пределах 25–35% за счет изменения режимов попуска.

Минимальная скорость течения наблюдается ночью и утром, максимальная — во второй половине дня.

В соответствии с распоряжением Росморречфлота «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутреннего водного пути габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2025 года» от 27.12.2024 № АТ-531-р судоходный участок в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла относится к внутренним водным путям первой категории.

Судоходство на рассматриваемом участке р. Волги регламентируется «Правилами плавания по внутренним водным путям» (2018) и «Правилами движения и стоянки судов в Волжском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации» (2018).

Содержание судовых ходов в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла осуществляет Казанский район водных путей и судоходства – филиал ФБУ «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей» в соответствии с «Правилами содержания судовых ходов и судоходных гидротехнических сооружений» (2020).

По данным лоцийного описания, составленного для верхней части озерно-речного участка р. Волги, расположенного в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла (Сазонов, 2015; Атлас ЕГС ЕЧ РФ, 2022), на отдельных участках данного водного пути установлены ограничения на расхождение и обгон крупнотоннажных судов и составов. К ним относятся:

- участок 1186.5–1188.1 км, расположенный на подходе к нижнему подходному каналу Чебоксарских шлюзов, выше месторождения Приверх острова Казин;

- участок 1191.31192.5 км, расположенный на входе в Новинскую воложку, ниже месторождения Приверх острова Казин;

- участок 1208.7–1213.5 км, расположенный на участках Демешкинского и Водолеевского перекатов, в границах горного отвода месторождения II Ураковское;

- участок 1239.8–1241.5 км, расположенный выше приверха о-ва Криушинский, в границах горного отвода месторождения Криушинское;

- участок 1244.51248.0 км, расположенный в границах переката Криушинский, за пределами участков горного отвода месторождения Криушинское.

Гарантированные габариты судового хода р. Волги на Куйбышевском водохранилище на навигацию 2025 г. приведены в табл. 1.7 согласно Приложению № 2 к распоряжению Росморречфлота «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутреннего водного пути габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений на навигацию 2025 года» от 27.12.2024 № АТ-531-р.

Установленная данным распоряжением продолжительность навигационного периода (период содержания навигационного оборудования) на Куйбышевском водохранилище составляет 213 суток – с 22 апреля по 20 ноября.

Рассчитанные значения обеспеченного навигационного уровня воды по данным наблюдений за уровнем воды на стационарных гидрологических постах в нижнем бьефе ГЭС за последние двадцать лет показали, что обеспеченность проектного уровня воды в створе поста НБ Чебоксарского гидроузла составляет 98.3%, что соответствует установленным нормативным значениям для участка водного пути данной категории.

Обеспеченность проектного уровня воды в створе гидрологического поста Козловка составила более 99.9%, что выше нормируемых значений обеспеченности.

Таблица 1.7. Гарантированные габариты судового хода р. Волги на Куйбышевском водохранилище

Table 1.7. Guaranteed dimensions of the ship passage of the river Volga on the Kuibyshev reservoir

Границы участков	Протяженность, км	Габариты судового хода			Водпост	Проектный уровень воды, м БС
		глубина, м	ширина, м	радиус, м		
Чебоксарский шлюз – н.п. Ураково	30	4.0	100	1200	НБ Чебоксарского г/у	(50.00)
н.п. Ураково – г. Казань	96	4.0	100	1200	ВБ Самарского г/у	(49.00)
г. Казань – Самарский шлюз	354	4.0	400	2500	ВБ Самарского г/у	(49.00)

1.7. Основные выводы

Проведенные исследования гидрологического и руслового режимов на рассматриваемом участке реки Волги, а также результаты математического моделирования характеристик движения воды и русловых деформаций в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС, позволили получить следующие основные выводы, затрагивающие вопросы обеспечения безопасности судоходства при освоении месторождений нерудных строительных материалов на верхнем участке Куйбышевского водохранилища.

1. Хронологический ход среднегодовых расходов воды у г. Чебоксары за 1877–2022 гг. свидетельствует о последовательном чередовании периодов различной водности, который подтверждает разностная интегральная кривая с пятью периодами повышенного и пониженного стока воды.

С 2006 г. началась маловодная фаза гидрологического цикла, которая продолжается до настоящего времени. Среднегодовой расход этой фазы составляет 3340 м³/с. Аналогичные периоды водности ранее были установлены для участка Нижней Волги в районе г. Волгограда.

2. С момента ввода Чебоксарского гидроузла в эксплуатацию в нижнем бьефе активизировались эрозионные процессы, что привело к однонаправленному понижению отметок дна на судовом ходу. До 2006 года средняя глубина на судовом ходу ежегодно увеличивалась на 4.4 см.

За последний анализируемый отрезок времени — с 2006 по 2022 гг. — на участке наблюдались незначительные знакопеременные деформации. На верхнем 30-километровом отрезке водного пути, расположенном от створа Чебоксарского гидроузла до н.п. Ураково, наблюдалась тенденция понижения отметок дна на судовом ходу со средней интенсивностью около 1.1 см в год.

3. Анализ совмещенных хронологических графиков минимальных уровней воды за навигационные периоды 1982–2022 гг. в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС и г/п р. Волга — с. Козловка свидетельствует о синхронности их колебаний. За период с 2006 г. по настоящее время наметился незначительный тренд на понижение минимальных уровней воды в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС со средней интенсивностью около 1.24 см в год.

В створе гидрологического поста Козловка отметки минимальных навигационных уровней воды понижаются менее интенсивно, на величину порядка 0.29 см в год.

4. Совмещенный график связи минимальных навигационных уровней воды в створах постов нижний бьеф Чебоксарской ГЭС — г/п с. Козлов-

ка, построенной за маловодные 1995 и 2010, 2013 и 2015 гг. наблюдений, свидетельствует о высокой тесноте связи между значениями уровней воды. Коэффициент корреляции связи ежедневных навигационных уровней воды за маловодные годы в створах данных постов составил 0.9271; средняя ошибка уравнения регрессии ± 24 см.

Эти результаты свидетельствуют о том, что на данный момент за весь период эксплуатации Чебоксарской ГЭС в нижнем бьефе гидроузла не произошло однонаправленного необратимого понижения уровней воды вследствие развития эрозионных процессов и карьерных разработок.

2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛГО-КАСПИЙСКОГО МОРСКОГО СУДОХОДНОГО КАНАЛА В УСЛОВИЯХ Понижения УРОВНЯ ВОДЫ В КАСПИЙСКОМ МЕРЕ

ВКМСК является одним из крупнейших гидротехнических сооружений в мировом масштабе и стратегически важным для экономики юга России объектом. В настоящее время состояние канала определяет возможность реализации ряда экономических и геополитических интересов государства, включая освоение нефтяных месторождений Каспийского моря российскими компаниями, транспортировку углеводородов, как добытых на шельфе, так и проходящих транзитом в другие бассейны, развитие судоходства и судоводных путей, входящих в состав трансконтинентальных транспортных коридоров, формирование рыбных запасов и нерестовой миграции ценных видов рыб.

Однако одним из основных факторов, усложняющих условия нормальной эксплуатации ВКМСК, является его заносимость, которая складывается из таких составляющих, как твердый сток Волги, сгонно-нагонные, ветро-волновые и ледовые явления. Различное сочетание этих составляющих, изменяющихся в весьма широких пределах как по величине, так и по эффективности своего воздействия, влечет за собой чрезвычайно изменчивые из года в год деформации дна и отложения наносов как по всему каналу, так и на отдельных его участках.

Условно ВКМСК, протяженностью 188 км, можно разделить на три характерных участка.

1. Речной участок, расположенный в дельте р. Волги (0–80 км судового хода).

2. Морской участок с бровками из отвалов грунта по обеим кромкам канала (80–155 км судового хода).

3. Свободный морской участок Каспийского моря (155–188 км судового хода).

В результате понижения уровня воды в Каспийском море канал претерпел изменения, связанные с трансформацией участков канала по их длине.

Для оценки влияния понижения уровня воды в Каспийском море на русловые переформирования ВКМСК и последствий для судоходства выполнен подробный анализ деформаций канала в виде их многолетних плановых форм. Для этого на морском участке ВКМСК с бровками из отвалов грунта произведено построение совмещенных планов участков за ряд лет, что позволит также уточнить влияние различных факторов заносимости судового хода на морфометрические характеристики канала. Кроме того, по планам можно установить тенденции развития деформаций в продольном направлении в условиях продолжающегося понижения уровня воды в Каспийском море, выявить наиболее проблемные с точки зрения влияния на естественный ход русловых процессов участки, а также провести оценку возможности поддержания навигационной глубины в целом.

Анализ совмещенных планов за 2020–2024 гг. дает представление о русловых переформированиях в условиях ограничения канала забровочными отвалами (в морской части), береговой полосой, а также об изменениях, происходящих на участках по наиболее характерным изобатам, которые в планах отдельных километров назначены по глубинам 4.2 м, 5.0 м, 5.2 м и 6.0 м.

Основные проблемы по обеспечению навигационных габаритов судового хода на канале наблюдаются в его морской части. В связи с этим

представляет интерес выявление основных направлений развития процессов трансформации морской ограниченной бровками части канала как наиболее деформируемой и влияющей на заносимость всего морского открытого участка ВКМСК и на подходах к нему со стороны Каспийского моря.

Участок 112–117 км ВКМСК

Участок на уровне характерных глубин 4.2 м и 5.0 м за период 2020–2024 гг. имеет достаточно устойчивое состояние судового хода в границах восточной и западной бровок канала, что говорит о стабильности глубин с локальными незначительными оползаниями откосов канала, связанными с начальной стадией процесса формирования признаков речного русла относительно прямолинейного типа. Для него характерны песчаные вдольбереговые образования, которые в естественных руслах располагаются в шахматном порядке по длине водотока (рис. 2.1).

Участок 117–120 км ВКМСК

Этот участок, как и вышерасположенный, также трансформируется в речной поток. Исходя из того, что ВКМСК создан с незначительными углами поворота, в условиях понижения уровня Каспийского моря на поворотном участке канала запущен естественный процесс размыва вогнутого берега вдоль восточной бровки. Значительную роль в данном процессе играют стеснение канала бровками обмелевших мест отвалов грунта, расположенных в близости от кромок судового хода. Поток на участке «собран» в пределах своего водотока,

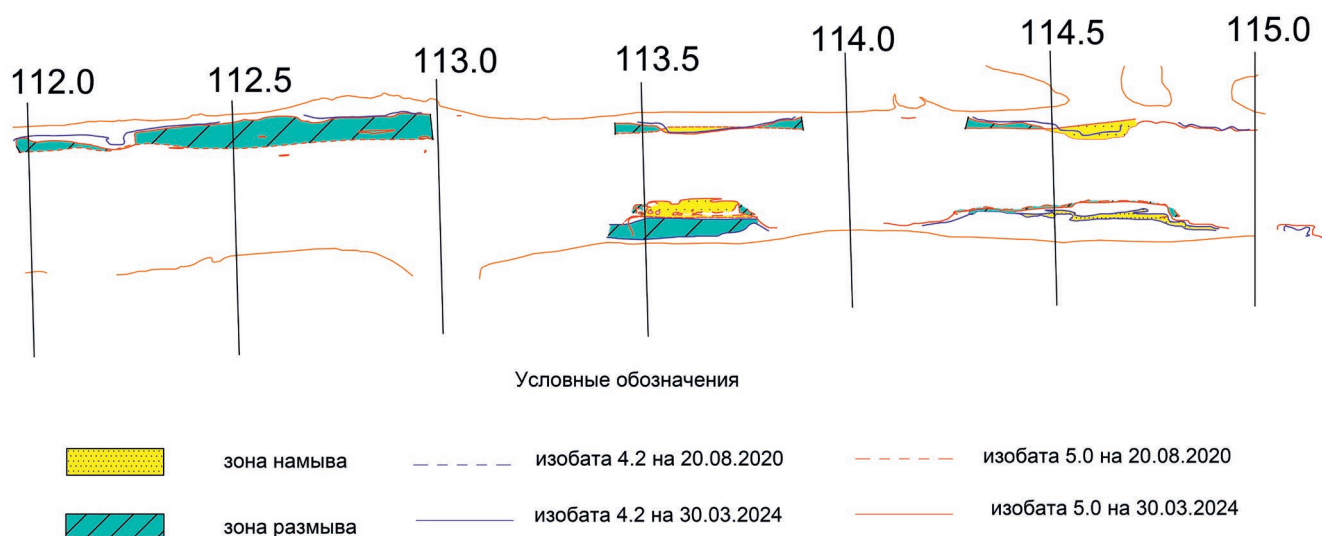


Рис. 2.1. Совмещенный план за 2020 и 2024 гг. 112–117 км судового хода

Рис. 2.1. Combined plan for 2020 and 2024 112–117 km of ship passage

Участок 135–137 км ВКМСК

Совмещенный план участка построен в осенний период, когда наблюдаются затяжные восточные ветры (17.11.2020 и 13.10.2024). Такие планы позволяют оценить влияние нагонных явлений на канале с точки зрения его заносимости в условиях ограниченных бровок.

Так, в рассматриваемый период на всем участке наблюдается сползание наносов в ВКМСК с восточной бровки с интенсивностью 25–70 см/год. Однако западная бровка тормозит наносы, поступающие в канал с противоположного отвала, и не позволяет им уходить транзитом за границы судового хода. Здесь у западной ограниченной отвалами бровки наносы, находящиеся уже в менее слежавшемся (разрыхленном) состоянии, легко уносятся потоком из-за повышенных скоростей (более 1 м/с) на участке ВКМСК (рис. 2.3).

Участок 136–140 км ВКМСК

На совмещенном плане участка просматривается влияние удаленности кромки отвала от ближайшей границы канала. Так, западная бровка отвала располагается в удалении на 160 м от бровки. И если на вышерасположенном участке из-за ограниченности канала с двух сторон наносы спускались вниз по течению, то здесь из-за удаленности бровки происходит их аккумуляция за счет увеличения площади поперечного сечения канала в районе 137 км. Процесс заносимости предсказуем и направлен на плановую трансформацию канала. При отсутствии же западной бровки (на 138–139 км) наносы перемещаются уже за пределы ВКМСК, что подтверждает нецелесообразность ограничения канала с двух сторон, а требуется ограничение лишь со стороны наиболее неблагоприятного ветрового

воздействия (в данном случае с восточной стороны). Причем удаленность отвала играет не последнюю роль в интенсивности заносимости канала.

Участок 140–144.25 км ВКМСК

По участку просматривается достаточно стабильный размыв западной бровки канала с его интенсификацией в районе протяженного восточного прорана.

Причины указанных плановых деформаций видятся в следующем.

1. Влияние открытой восточной стороны значительно. Кроме того, при восточном ветре, в период действия которого построен план, без закрытия указанной стороны канала наблюдаются значительные переформирования. Если на вышерасположенном участке, где нет таких протяженных проранов вдоль восточной бровки, идет аккумуляция наносов из отвалов, то здесь — размыв левой кромки канала. Для уменьшения заносимости рассматриваемого участка канала необходимо закрытие восточной стороны, однако местоположение отвала должно быть по возможности удалено от кромки ВКМСК минимум на 100–200 м.

2. Ввиду значительной зоны донной эрозии на 143–143.75 км в плане поток снабжается дополнительным расходом наносов, которые при резком снижении скорости течения ниже по участку всегда будут откладываться на канале совместно с влекомыми и взвешенными наносами,двигающимися по рассматриваемому участку транзитом.

3. Ввиду наблюдаемых повышенных скоростей движения потока по участку здесь наблюдается достаточно стабильный процесс саморазмыва канала даже без участия неблагоприятного действия ветра. Поэтому все частицы грунта, вымываемые потоком

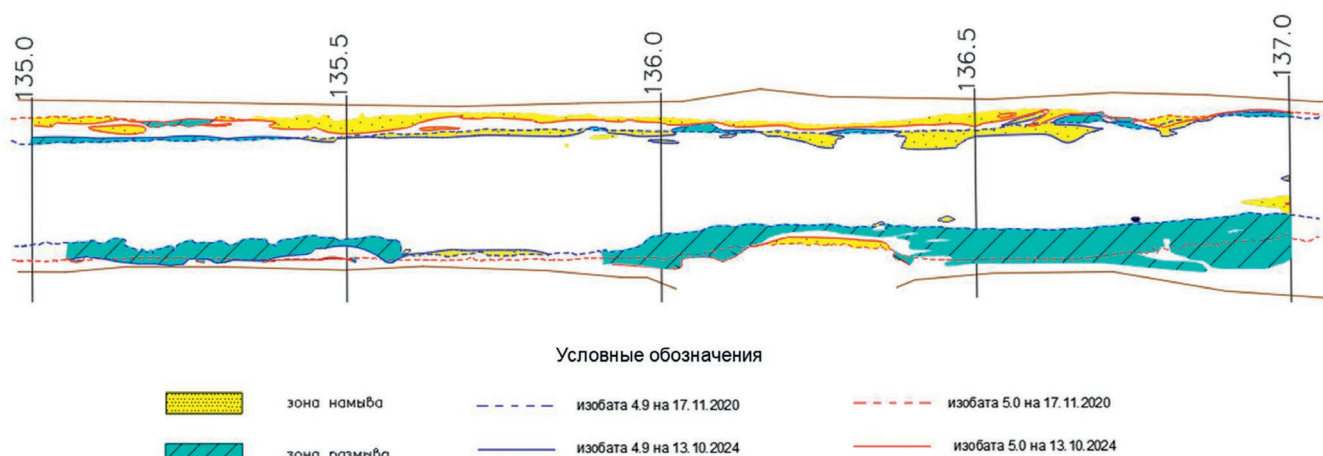


Рис. 2.3. Совмещенный план за 2020 и 2024 гг. 135–137 км судового хода

Fig. 2.3. Combined plan for 2020 and 2024 135–137 km of ship passage

со дна и забровочного пространства, подпитывают заносимость канала ниже рассматриваемых километров судового хода. Для уменьшения заносимости целесообразнее всего найти возможность снизить скорость движения потока по участку.

Участок 147–150 км ВКМСК

В настоящее время именно рассматриваемый участок судового хода является началом перехода зоны интенсивного размыва канала в зону направленной аккумуляции наносов. Непосредственно здесь начинается зона выклинивания подпора уровня Каспийского моря со всеми вытекающими отсюда процессами резкого уменьшения скоростного поля, наличия обратных уклонов свободной поверхности, наиболее сильного влияния ветровых течений и связанных с ними процессов образования ветровых волн. Кроме того, на участке ввиду понижения «экстремальных» для канала значений скорости течения более 1 м/с до наиболее благоприятных (0.6–0.7 м/с) опять запущен процесс переформирования ВКМСК в русловую систему с мелководными участками, боковыми побочными и остальными русловыми образованиями, связанными с деформациями русел естественных рек.

Участок 150–155 км ВКМСК

Изменения в районе поворота канала в большей степени связаны с русловыми переформированиями, когда поток плавно переваливается от одного берега (в данном случае от одной кромки) к другому. Здесь создается ограниченное бровками искривление судового хода с характерными вдолькромочными отмелями.

Кроме того, максимальное по размерам песчаное образование (коса) формируется у выпуклой

(восточной) стороны канала, распространяясь практически до вогнутой (западной) кромки канала, создавая отмель по всей ширине ВКМСК (рис. 2.4).

На основе проведенного подробного анализа совмещенных планов с 2020 по 2024 г. можно сделать следующие основные выводы:

1. Канал до 140 км к 2024 г. в значительной степени разработан не только по глубине, но и по ширине потока. Это связано с интенсификацией скоростей течения по длине канала.

2. При скоростях течения, приближенных к характерным значениям для естественных русел равнинных рек, на канале наблюдается трансформация в виде формирования перекатных участков — локальных аккумуляций наносов побочного типа вдоль кромочных отмелей. Они искривляют динамическую ось канала и свидетельствуют о наличии грядового режима движения.

3. За счет увеличения скорости течения на поворотных участках (особенно на Большом повороте, 151 км) происходит формирование более крутых изгибов: размыв условно вогнутых бровок и заносимость выпуклых — по принципу движения потока на поворотах реки.

4. Изменения скоростного поля потока в сторону значительных величин спровоцированы следующими факторами:

а) ограниченность потока двумя кромками канала с близко расположенными отмелями, образованными отвалами грунта, которые при понижении уровня Каспийского моря «обсохли»;

б) понижение уровня Каспийского моря и отступление морской части с относительно горизонтальным уровнем воды ниже 155 км канала;

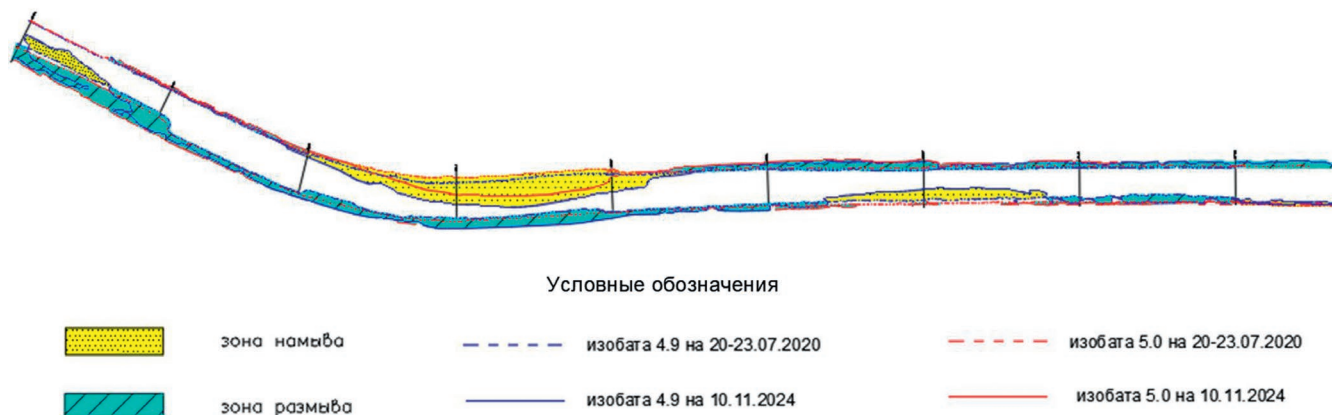


Рис. 2.4. Совмещенный план за 2020 и 2024 гг. 150–157 км судового хода

Fig. 2.4. Combined plan for 2020 and 2024 150–157 km of ship passage

в) наличие занесенных проранов различной ширины, которые не гасят поток и не оттягивают его частично в сторону свободной морской забровочной части.

5. Специфика канала состоит в том, что на достаточно протяженном участке требуется выдерживать навигационную глубину, достигаемую только дноуглублением до заданной постоянной отметки дна. Ровное по длине дно после дноуглубительных работ оказывает малое сопротивление потоку, и весь поток стекает в море по принципу гидравлического лотка трапецеидального сечения.

6. Близко расположенные вдоль канала отвалы грунта оказывают сильное влияние на возвратную заносимость.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в связи с понижением уровня Каспийского моря интенсивность заносимости морских участков канала в ближайшей перспективе будет расти ускоренными темпами. Это потребует увеличения объемов ремонтных дноуглубительных работ для обеспечения безопасных условий судоходства, если не принимать организационно-технических мер по снижению заносимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС за период эксплуатации сформировалась устойчивая тенденция эрозионного врезания русла. Однако к настоящему времени (спустя 40 лет) интенсивность деформаций снизилась до 1.1 см/год, что сопоставимо с понижением межженных уровней воды. Анализ многолетних данных не выявил однонаправленного необратимого падения уровней, обусловленного разработкой русловых карьеров, хотя потенциальная опасность дополнительного понижения в маловодные годы сохраняется.

На Волго-Каспийском канале доказано, что понижение уровня Каспийского моря провоцирует ускоренную трансформацию канала в речное русло с формированием перекаатов, побочней и грядового рельефа. Это ведет к росту заносимости и потребует увеличения объемов дноуглубительных работ.

Общим выводом является необходимость учета естественных и антропогенных изменений при планировании дноуглубления, проектировании карьеров и управлении режимами попусков гидроузлов. Рекомендовано продолжить мониторинг русловых деформаций и совершенствовать математическое моделирование для своевременной адаптации судоходной инфраструктуры к изменяющимся условиям.

ЛИТЕРАТУРА

Агеев С.О. Совершенствование научно-методического обеспечения эксплуатации низконапорных гидроузлов в целях улучшения условий судоходства в их бьефах (на примере Нижегородского низконапорного гидроузла на р. Волга): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 <Эксплуатация водного транспорта, судовождение>, Н. Новгород, 2021.

Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л. и др. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода, химия и экология, № 4, апрель 2013. С. 2–12.

Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ (т. 6, ч. 1. Река Волга от Чебоксарского гидроузла до Самарского гидроузла). ФБУ «Администрация Волжского бассейна». 2022.

Болгов М.В., Левит-Гуревич Л.К. Задачи и функции системы поддержки водохозяйственных решений по управлению водными ресурсами Нижней Волги // Водные ресурсы. № 5. Т. 40. 2013. С. 507–518.

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб: ГГИ, 2008. 600 с.

Временные основные правила использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища на р. Волге (на период начальной эксплуатации), РВ-249-82, утверждены приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства РСФСР от 2 сентября 1982 г. № 531.

Гладков Г.Л. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла / Г.Л. Гладков, П.С. Ржаковская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2023. Т. 15. № 3. С. 344–358.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358.

Гладков Г.Л., Католиков В.М. Гидроморфологическое обоснование судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге. Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: доклады и сообщения. Пермь, 2023. С. 27–42.

Гладков Г.Л., Католиков 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: Сб. науч. тр.: Вып. 6 / Под ред. проф. Г.Л. Гладкова, К.П. Моргунова. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2023. С. 24–43.

Гладков Г.Л. Гидроморфология русел судоходных рек / Г.Л. Гладков, Р.С. Чалов, К.М. Беркович. 4-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 432 с. ISBN 978-5-507-46274-2. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система.

URL: <https://e.lanbook.com/book/305216>

Гладков Г.Л. Водные пути / Г.Л. Гладков, М.В. Журавлев, А.Ю. Жук. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 504 с. ISBN 978-5-507-45475-4. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/302396>

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 311 с.

Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08-2012.

Ежегодные данные о ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1. Вып. 24. Бассейны Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. 1962–2019 гг.

Информация по погоде по данным метеостанции «Аэропорт Нариманово»

<https://ru.weatherspark.com/map?id=148839&pageType=7&yearNumber=2007>

Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации от 07.03.2001 № 24-ФЗ (ред. от 10.07.2023).

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Вклад деятельности человека в формирование экстремальных гидрологических ситуаций // Экстремальные гидрологические ситуации / Отв. ред. Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. М.: ООО «Медиа-ПРЕСС». 2010. С. 163–178.

Кривошей В.А. О Чебоксарском водохранилище и Городецком шлюзе // Гидротехника, 2011. № 4 (25). С. 21–30.

Минеева К.К., Русинова Н.Г. Планы строительства Чебоксарской ГЭС в 1940-е годы // Вестник Чувашского университета, № 2, 2021, с. 127–132.

Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги [Электронный ресурс] / Коллектив авторов; под редакцией Георгиевского В.Ю. Электрон. текстовые и граф. дан. в формате PDF (2 файла: 35Мб). Ливны: Издатель Мухаметов Г.В., 2015.

Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 1. Нижнее Поволжье. Л.: Гидрометеоздат, 1976, 1980 гг.

Основные правила использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на р. Волге, утверждены приказом Министерства мелиорации

и водного хозяйства РСФСР от 11 ноября 1983 г. № 596.

Правила движения и стоянки судов в Волжском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации. Утверждены приказом Минтранса России от 2 августа 2018 г. № 282.

Правила плавания по внутренним водным путям. Утверждены приказом Минтранса России № 19 от 19 января 2018 г. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 7 марта 2018 г. (регистрационный № 50283).

Правила содержания судовых ходов и судоходных гидротехнических сооружений. Утверждены приказом Минтранса России № 113 от 8 апреля 2020 г. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 9 июня 2020 г. (регистрационный № 58613).

Распоряжение Росморречфлота от 27.12.2024 № АТ-531-р «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2025 года».

Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СО 34.21.204-2005. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Санкт-Петербург, 2006.

Родионов А.А., Румянцев В.А., Федоров 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

Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках. СПб.: ЛИВТ, 1992. 312 с.

Сазонов А.А. Специальная лоция ЕГС. Ч. V. Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское водохранилища: учеб. пособие для студ. и курсан. оч. и заоч. обуч. высш. и сред. спец. учеб. завед.: специальность 180402 «Судовождение» / А.А. Сазонов, В.С. Добровольский. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. 92 с.

СП 11-103-97. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Одобрено Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России (письмо от 10.07.1997 № 9-1-1/69). Принят и введен в действие с 15 августа 1997 г.

ОБ АВТОРАХ

СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Одобрен для применения в качестве нормативного документа постановлением Госстроя России № 218 от 26 декабря 2003 г. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Волга. Книга 7. Сводный том СКИОВО. 219 с.

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

Характерные уровни воды рек, каналов, озер и водохранилищ (погодичные данные). Т. 1. РСФСР, вып. 24. Бассейны р. Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. Л.: Гидрометеиздат, 1985, 1989.

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

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика / Р.С. Чалов. М.: КРА-САНД, 2011. Т. 2. Морфодинамика речных русел. 960 с.

Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 334 с.

Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Vacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng & Felipe Quintero (2020) Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows, *Journal of Hydraulic Research*, 58:6, 867-887, DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742

Гладков Геннадий Леонидович – ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой водных путей и водных изысканий. Служебный адрес: РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. gladkovgl@gumrf.ru

Беляков Пахом Витальевич – ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». Кандидат технических наук, доцент кафедры водных путей и водных изысканий. Служебный адрес: РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. belyakovpv@gumrf.ru

Еремеева Анна Олеговна – ФГБУ «Государственный гидрологический институт». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Служебный адрес: РФ, г. Санкт-Петербург, 2-я линия ВО, д. 23. eranol@mail.ru

Ситнов Александр Николаевич – ФГБОУ ВО «ВГУВТ». Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений. Служебный адрес: РФ, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а. sitnov.an@vsuwt.ru

Воронина Юлия Евгеньевна – ФГБОУ ВО «ВГУВТ». Кандидат технических наук, доцент кафедры водных путей и гидротехнических сооружений. Служебный адрес: РФ, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а. Yulez@yandex.ru

HYDROMORPHOLOGICAL REGIME AND PROVISION OF NAVIGABLE CONDITIONS ON THE MIDDLE AND LOWER VOLGA, TAKING INTO ACCOUNT CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC CHANGES

G.L. Gladkov^{1*}, P.V. Belyakov¹, A.O. Eremeeva²,
A.N. Sitnov³, Yu.E. Voronina³

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russia

² State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

³ Volzhsky State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

*gladkovgl@gumrf.ru

Abstract. The paper presents the results of comprehensive studies of the hydromorphological regime of the Lower Volga at two sites: the tailrace of the Cheboksary HPP and the Volga-Caspian Sea Navigation Canal. For the first time, longterm hydrological and channel observations (from 1877 to the present) are combined with mathematical modeling data. Methods of correlation-regression analysis, water level exceedance probability assessment, and comparison of channel survey plans are used. It is established that in the tailrace of the Cheboksary HPP, after 40 years of operation, the intensity of erosion has decreased to 1.1 cm/year, and the correlation of water levels between the

gauges “HPP tailrace” and “Kozlovka village” is 0.927, indicating the absence of irreversible water level lowering associated with the development of channel quarries. On the Volga-Caspian Canal, it is shown that the lowering of the Caspian Sea level provokes accelerated transformation of the canal into a river channel with the formation of riffles, side bars, and dune bedforms, leading to increased siltation and necessitating larger dredging volumes. The obtained results are of practical importance for planning dredging operations, optimizing hydropower release regimes, and locating spoil disposal sites.

Keywords: channel morphometric characteristics, flow velocity, sediment transport, dune bedform parameters, channel deformations, Volga-Caspian Canal, Cheboksary HPP

REFERENCES

- Ageev S.O. Improvement of scientific and methodological support for the operation of low-head hydroelectric facilities in order to improve navigation conditions in their tailraces (using the example of the Nizhny Novgorod low-head hydroelectric facility on the Volga River): abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation: 05.22.19 “Operation of water transport, navigation”. Nizhny Novgorod, 2021. (In Russ.)
- Alekseevskiy N.I., Frolova N.L. et al. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river runoff of the Volga basin // *Water, Chemistry and Ecology*. No. 4, April 2013. P. 2–12. (In Russ.)
- Annual Data on Surface Water Resources of Land. Part 1. Rivers and Canals. Vol. 1. Issue 24. Volga Basins (middle and lower reaches) and Ural. 1962–2019. (In Russ.)
- Atlas of the Unified Deep-Water System of the European Part of the Russian Federation (Vol. 6, Part 1. Volga River from the Cheboksary Hydroelectric Facility to the Samara Hydroelectric Facility). Federal Budgetary Institution “Administration of the Volga Basin”. 2022. (In Russ.)
- Basic Rules for the Use of Water Resources of the Kuibyshev Reservoir on the Volga River, approved by Order No. 596 of the Ministry of Land Reclamation and Water Management of the RSFSR dated November 11, 1983. (In Russ.)
- Bolgov M.V., Levit-Gurevich L.K. Tasks and functions of the decision support system for water resources management of the Lower Volga // *Water Resources*. No. 5. Vol. 40. 2013. P. 507–518.
- Chalov R.S. *River Channel Science: Theory, Geography, Practice* / R.S. Chalov. Moscow: LKI Publishing House, 2008. Vol. 1: Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms of Manifestation and Conditions of River Channel Formation. 608 p. (In Russ.)
- Chalov R.S. *River Channel Science: Theory, Geography, Practice* / R.S. Chalov. Moscow: KRASAND, 2011. Vol. 2: Morphodynamics of River Channels. 960 p. (In Russ.) Characteristic Water Levels of Rivers, Canals, Lakes and Reservoirs (annual data). Vol. 1. RSFSR, issue 24. Basins of the Volga River (middle and lower reaches) and the Ural River. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 1989. (In Russ.)
- Code of Inland Water Transport of the Russian Federation dated 07.03.2001 No. 24-FZ (as amended on 10.07.2023). (In Russ.)
- Code of Practice SP 11-103-97. EngineeringHydro-meteorological Surveys for Construction. Approved by the Department of Development of ScientificTechnical Policy and DesignSurvey Works of Gosstroy of Russia (letter No. 9-1-1/69 dated 10.07.1997). Adopted and put into effect on August 15, 1997. (In Russ.)
- Code of Practice SP 33-101-2003. Determination of Basic Calculated Hydrological Characteristics. Approved for use as a normative document by Resolution No. 218 of Gosstroy of Russia dated December 26, 2003. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004. 73 p. (In Russ.)
- Extraction of NonMetallic Construction Materials in Water Bodies. Consideration of Channel Processes and Recommendations for Design and Operation of Channel Quarries. Standard of the Organization (STO) of the Federal State Budgetary Institution “State Hydrological Institute (GGI)” 52.08-2012. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Chalov R.S., Berkovich K.M. *Hydromorphology of Navigable River Channels*. 4th ed., ster. St. Petersburg: Lan’, 2023. 432 p. ISBN 978-5-507-46274-2. Text: electronic // Lan’: electronic library system. URL: <https://e.lanbook.com/book/305216> (In Russ.)
- Gladkov G.L., Katolikov V.M. Hydromorphological substantiation of navigation in the tailrace of the Nizhny Novgorod Hydroelectric Facility on the Volga River // *Thirtyeighth Plenary Interuniversity Coordination Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuary Processes: reports and communications*. Perm, 2023. P. 27–42. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Katolikov V.M., Rzhakovskaya P.S. Flow hydraulics and sediment transport parameters under unsteady water movement in tailraces of hydroelectric facilities on navigable rivers // *Waterways and Channel Processes. Hydraulic Structures of Waterways: Collection of scientific papers*. Issue 6 / Ed. by prof. G.L. Gladkov, K.P. Morgunov. St. Petersburg: Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2023. P. 24–43. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S. Hydraulic characteristics of river flow and sediment transport conditions

- in the tailrace of a hydroelectric facility // Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2023. Vol. 15. No. 3. P. 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358. (In Russ.)
- Gladkov G.L., Zhuravlev M.V., Zhuk A.Yu. Waterways. St. Petersburg: Lan', 2023. 504 p. ISBN 978-5-507-45475-4. Text: electronic // Lan': electronic library system.
- URL: <https://e.lanbook.com/book/302396> (In Russ.)
- Grishanin K.V. Dynamics of Channel Flows. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 311 p. (In Russ.)
- Guidelines for Improving Navigation Conditions on Free Rivers. St. Petersburg: Leningrad Institute of Water Transport (LIVT), 1992. 312 p. (In Russ.)
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. The contribution of human activity to the formation of extreme hydrological situations // Extreme Hydrological Situations / Ed. by N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova, I.S. Zaitseva. Moscow: Media-PRESS LLC. 2010. P. 163–178. (In Russ.)
- Krivoshey V.A. On the Cheboksary Reservoir and the Gorodets Lock // Gidrotehnika (Hydraulic Engineering). 2011. No. 4 (25). P. 21–30. (In Russ.)
- Main Hydrological Characteristics (for 1963–1970 and the entire observation period). Vol. 12. Lower Volga and Western Kazakhstan. Issue 1. Lower Volga. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 1980. (In Russ.)
- Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng & Felipe Quintero (2020) Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows // Journal of Hydraulic Research. 58:6, 867-887.
- DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742
- Mineeva K.K., Rusinova N.G. Plans for the construction of the Cheboksary HPP in the 1940s // Bulletin of the Chuvash University. No. 2, 2021. P. 127–132. (In Russ.)
- Order of the Federal Agency for Maritime and River Transport (Rosmorrechflot) dated December 27, 2024 No. AT531r “On establishing categories of inland waterways that determine the dimensions of navigable channels and navigational hydrographic support for navigation conditions of vessels, the list of navigable channels, as well as the operating periods of navigation aids and navigable hydraulic structures during the 2025 navigation season”. (In Russ.)
- Recommendations for Predicting Channel Transformation in Tailraces of Hydroelectric Facilities. Standard of the Organization (SO) 34.21.204-2005. JSC “B.E. Vedenev All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering (VNIIG)”. St. Petersburg, 2006. (In Russ.)
- Rodionov A.A., Rumyantsev V.A., Fedorov M.P. et al. Options for solving navigation problems on the constricted section of the Volga River from the Gorodets Hydroelectric Facility to Nizhny Novgorod, including assessment of the impact on the sanitary-epidemiological and environmental situation in the region // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 109–131.
- DOI: 10.48612/fpg/abfh-m2n7--9mn6 (In Russ.)
- Rules for Navigation and Anchoring of Vessels in the Volga Basin of Inland Waterways of the Russian Federation. Approved by Order No. 282 of the Ministry of Transport of Russia dated August 2, 2018. (In Russ.)
- Rules for the Maintenance of Navigable Channels and Navigable Hydraulic Structures. Approved by Order No. 113 of the Ministry of Transport of Russia dated April 8, 2020. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on June 9, 2020 (registration No. 58613). (In Russ.)
- Rules of Navigation on Inland Waterways. Approved by Order No. 19 of the Ministry of Transport of Russia dated January 19, 2018. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on March 7, 2018 (registration No. 50283). (In Russ.)
- Sazonov A.A., Dobrovolsky V.S. Special Pilotage Guide of the Unified Deep Water System (EGS). Part V. Kuibyshev, Saratov and Volgograd Reservoirs: textbook for students and cadets of higher and secondary specialized educational institutions, specialty 180402 “Navigation”. Nizhny Novgorod: Publishing House of Volga State University of Water Transport (VGUVT), 2015. 92 p. (In Russ.)
- Scheme for Integrated Use and Protection of Water Bodies of the Volga River Basin. Book 7. Summary Volume of the Scheme (SKIOVO). 219 p. (In Russ.)
- Scientific and Applied Handbook: Main Hydrological Characteristics of Rivers of the Upper Volga Basin [Electronic resource] / Team of authors; ed. by Georgievskiy V. Yu. Electronic text and graphics in PDF (2 files: 35 MB). Livny: Publisher Mukhametov G.V., 2015. (In Russ.)
- Shiklomanov I.A. Influence of Economic Activities on River Runoff. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 334 p. (In Russ.)
- Temporary Basic Rules for the Use of Water Resources of the Cheboksary Reservoir on the Volga River (for the period of initial operation), RV-249-82, approved by Order No. 531 of the Ministry of Land Reclamation and Water Management of the RSFSR dated September 2, 1982. (In Russ.)
- Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035. Approved by Order No. 3363r of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021. (In Russ.)
- Water Resources of Russia and Their Use / Ed. by I.A. Shiklomanov. St. Petersburg: State Hydrological Institute (GGI), 2008. 600 p. (In Russ.)

ABOUT THE AUTHORS

Gladkov Gennady Leonidovich – FSBEI HE «GUMRF named after Admiral S.O. Makarov.» Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of the Department of Waterways and Water Surveys. Business address: 5/7 Dvinskaya St., gladkovgl@gumrf.ru, St. Petersburg, Russia

Belyakov Pakhom Vitalievich – FSBEI HE «GUMRF named after Admiral S.O. Makarov.» Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Waterways and Water Surveys. Business address: 5/7 Dvinskaya St., belyakovpv@gumrf.ru, St. Petersburg, Russia

Eremeeva Anna Olegovna – FSBI «State Hydrological Institute». Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. Business address: 23, 2nd line VO, St. Petersburg, Russian Federation, eranol@mail.ru

Sitnov Alexander Nikolaevich – FSBEI HE «VGUVT» Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of the Department of Waterways and Hydraulic Structures. Business address: Russian Federation, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5a. sitnov.an@vsuwt.ru

Voronina Julia Evgenievna – FSBEI HE «VGUVT» Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures. Business address: Russian Federation, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5a. Yulez@yandex.ru

УДК 556.5:551.4.04(075.8)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОГРАФО-ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ В УЧЕНИИ О РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ (ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ РУСЛОВЕДЕНИЕ): ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

Р.С. Чалов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет
rschalov@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.2026

После доработки 28.01.2026

Принята к публикации 05.02.2026

Аннотация. Статья посвящена анализу современного состояния географо-гидрологического направления в изучении условий формирования, морфологии и динамики речных русел. Приводится историческая справка и дается оценка роли Н.И. Маккавеева в создании данного направления и соответствующей научной школы, обосновывается значение географо-гидрологического подхода в развитии учения о русловых процессах (русловедения) и решении связанных с ним прикладных задач, показывается соотношение с гидроморфологической теорией руслового процесса ГГИ, гидродинамическим и гидротехническим подходами. Последовательно рассматриваются основные положения направления: механизм и формы проявления русловых процессов на равнинных, полугорных и горных реках; сток рек и их водный режим как ведущие факторы русловых процессов (малые и большие реки); геолого-геоморфологические условия формирования русел (свободное и ограниченное развитие русловых деформаций); сток и состав наносов; вертикальные русловые деформации (врезание и аккумуляция наносов); морфодинамические типы русел, их разнообразие и их эволюция; грядовое движение наносов и формирование руслового рельефа; поймы рек как производные русловых процессов и их фактор; палеорусловой анализ и прогнозирование русловых переформирований при гидроклиматических изменениях и антропогенных воздействиях; русловые процессы как составная часть эрозионно-русловых систем.

Ключевые слова: русловые процессы; горные и равнинные, большие и малые реки; свободные и ограниченные русловые деформации; морфодинамика русел; перекаты и пороги; поймы рек; палеорусловой анализ

DOI: [10.71367/3034-4638-2026-1-1-89-104](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2026-1-1-89-104)

ВВЕДЕНИЕ

Учение о русловых процессах — междисциплинарная наука, развивающаяся на стыке гидрологии суши и флювиальной геоморфологии, с одной стороны, гидродинамики и гидротехники, с другой. Как отрасль знаний, она возникла на рубеже XIX и XX вв. при решении практических задач, связанных с освоением речных ресурсов, в первую очередь рек как водных путей сообщения, и защитой инженерных и других объектов от опасного и неблагоприятного воздействия водных потоков (размылов берегов, наводнений и пр.). Первые публикации, заложившие основы теории русловых процессов (хотя сам термин появился намного позднее), принадлежали инженерам-путейцам В.М. Лохтину

(1897) и Н.С. Лебявскому (1898), деятельность которых была посвящена освоению рек как водных путей сообщения. Но уже в их трудах, особенно в работе В.М. Лохтина «О механизме речного русла» (1897), была показана зависимость руслоформирующей деятельности рек от природных условий и взаимодействие водных потоков с грунтами, слагающими русла рек. Тем не менее до 1940-х гг. изучение русловых процессов осуществлялось в рамках технических наук — гидравлики, в которой стала выделяться динамика русловых (или водных) потоков (гидродинамика, или речная гидравлика), и гидротехники (русловая, или речная, гидротехника), непосредственно занимающейся

решением производственных задач. В это же время появились термин «русловой режим рек» (Маккавеев, 1949) и словосочетание «русловые процессы» (без его определения), впервые примененное М.И. Львовичем (1936), связавшие эти процессы с формированием на малых реках при переносе наносов россыпных месторождений золота. Тогда же Н.И. Маккавеев, работая в НИИ речного флота, но будучи профессионалом-географом, в своих научных трудах обосновал природоведческий (географо-гидрологический) подход не только к исследованиям русловых процессов¹, но и к разработке методов управления ими на судоходных реках (Маккавеев, Советов, 1940; Маккавеев, 1949)². Окончательно русловые процессы как раздел географической науки (гидрологии, геоморфологии) стали изучаться после защиты Н.И. Маккавеевым в 1953 г. докторской диссертации, выхода в свет его классической монографии «Русло реки и эрозия в ее бассейне» (1955) и организации им на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова сначала соответствующих научных исследований и учебных курсов, а в 1969 г. — научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов, носящей сейчас его имя.

В настоящее время географо-гидрологическое направление в учении о русловых процессах, получившее свое название — русловедение, продолжает и развивает теорию и методологию, разработанную Н.И. Маккавеевым, представляет собой одну из трех основных научных школ в изучении русловых процессов. Его особенностью являются, во-первых, реализация триединства «наука—образование—практика», обеспечивающего совмещение фундаментальных теоретических исследований русловых процессов и руслового режима рек в разных природных условиях, их применения на основе выявленных закономерностей русловых деформаций к обоснованию методов и приемов управления русловыми процессами и подготовки специалистов, в том числе высшей квалификации.

Существенную роль в становлении географо-гидрологического направления в учении о русловых процессах сыграли труды географов, геоморфологов и геологов В.В. Докучаева, А.П. Павлова, В.В. Ламакина, Е.В. Шанцера и других, которые, изучая рельеф, историю развития речных долин и слагающих речные террасы и поймы аллювиальных отложений, обратили внимание на морфологию

русел, их временную изменчивость и зависимость от природных условий. Однако их исследования осуществлялись независимо от работы водных потоков, стока и перемещения наносов. В известной мере исключение представляла монография Е.В. Шанцера (1951), которому, наверное, впервые принадлежала попытка применения законов гидравлики к объяснению морфологии русел и речных отложений.

Объединение геолого-геоморфологического изучения речных русел и гидродинамического подхода к изучению русловых процессов произошло в 1950-е гг. благодаря упомянутым трудам Н.И. Маккавеева, приведшим к созданию географо-гидрологического направления (научной школы) в изучении русловых процессов, и работам Н.Е. Кондратьева и И.В. Попова, впервые обобщенным в монографии «Русловой процесс» (Кондратьев, Ляпин и др., 1959), явившейся основой создания «гидроморфологической теории руслового процесса». Это второе направление в природоведческом изучении русловых процессов, активно развивавшееся в 1960—1980-е гг. (Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982), получило официальное признание благодаря включению его результатов в различные нормативные документы по учету русловых процессов при решении практических задач, связанных с использованием водных и других речных ресурсов, гидротехническим строительством на реках и т. д. (кроме водных путей на реках). Оба эти направления различаются, иногда существенно, в методологических подходах к типизации русловых процессов, терминологии и решению некоторых теоретических вопросов. Согласование их и сближение обуславливают прогресс в развитии учения о русловых процессах и его применении в практических целях.

Третье направление, сохраняющееся в рамках инженерно-технического подхода к изучению русловых процессов, — гидродинамическое, продолжающее традиции его основоположников (М.А. Великанова, И.И. Леви, В.Н. Гончарова, К.В. Гришанина, А.В. Караушева и др.), решение теоретических и прикладных проблем русловых процессов на основе законов гидравлики и гидродинамики, определяющих механизмы воздействия потоков на грунты и русла рек. При этом в рамках географо-гидрологического и гидроморфологического направлений использование результатов гидродинамических исследований создает физи-

¹ В науку это понятие было введено и дано его определение М.А. Великановым (1946), который в те годы был сотрудником отдела геоморфологии Института географии АН СССР.

² Кандидатская диссертация Н.И. Маккавеева, защищенная в 1941 г. в ЛГПИ им. А.И. Герцена, называлась «Механизм формирования русел равнинных рек СССР».

ческую основу для понимания механизмов русловых процессов на реках, протекающих в разных природных условиях, что проявляется в издании общих трудов, объединяющих природоведческие и технические (гидравлико-гидротехнические) подходы к их изучению (Барышников, Попов, 1988; Гладков и др., 2016).

Теоретические, методологические и прикладные аспекты географо-гидрологического направления в учении о русловых процессах получили дальнейшее развитие в трудах самого Н.И. Маккавеева и под его руководством (Маккавеев, Хмелева и др., 1961; Проектирование ..., 1964; Маккавеев, 1971; Маккавеев, Чалов, 1986), были обобщены в монографии (Чалов, 2008, 2011, 2019) и в сжатом виде в статье (Чалов, 2012), в работах его учеников и прямых последователей (Сидорчук, 1992; Алексеевский, 1998; Беркович, 2001; Чернов, 2013), а также получили широкое распространение в научных исследованиях в России и за рубежом (Шэнь Юйчан, Гун Гоюань, 1986; Бутаков, Назаров и др., 2000; Babiński, 2002; Назаров, Егоркина, 2004; Рысин, Петухова, 2006; Махинов, Лю Шугуан, 2013; Ободовский, 2017; Середовских, 2022).

Цель настоящей статьи – дать анализ современного (на уровне 2020-х гг.) состояния и основных положений этого направления, основу которого составляет представление о русловых процессах как гидромеханическом явлении («взаимодействие потока и русла определяет самоё основу и динамическую сущность руслового процесса» (Великанов, 1958, с. 14)), развитие и проявление которого в морфологии и динамике речных русел зависит от водоносности и водного режима рек, кинематики, гидродинамической структуры потока и их пространственно-временных изменений, геолого-геоморфологических и других природных условий, в которых протекают реки, формируя свои русла. Эти положения вытекают из определения русловых процессов (Маккавеев, Чалов, 1986, с. 4; Чалов, 2008, 2017, с. 15) как «совокупность явлений, связанных взаимодействием потока и грунтов, слагающих ложе реки, эрозией, транспортом и аккумуляцией наносов, определяющих размывы дна и берегов рек, развитие различных форм русел и форм руслового рельефа, режим их сезонных, многолетних и вековых изменений». Ниже рассматриваются основные итоги выполненных исследований, позволяющие оценить современный уровень географо-гидрологического направления в русловедении и получить представление о его основных теоретических положениях.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РУСЛОВЕДЕНИЯ

1. Взаимодействие водного потока с руслом и особенности транспорта наносов, поступающих в реки в результате воздействия потока на грунты, слагающие их ложе и берега, а также с территории водосбора, определяется кинематикой потока, зависящей от продольного уклона, крупности наносов, являющихся руслообразующими, и размеров самого потока (его водоносностью и мощностью), с одной стороны, и устойчивостью грунтов к размыву, с другой. Поэтому все реки разделяются по типу русловых процессов на равнинные со спокойными потоками и горные с бурными. Промежуточное положение занимают полугорные реки, кинематический режим которых неодинаков в разные фазы водного режима – бурный в половодья и в паводки, спокойный в межень. При этом степень кинетичности у бурных потоков и, как следствие, ее проявление в форме транспорта наносов зависят от водности потока и крупности галечно-валунных наносов, определяя разделение русел рек на порожисто-водопадные, с неразвитыми (безгрязное движение наносов) и развитыми аллювиальными формами (гряздами) (Чалов, 1979, 2008), отличающиеся по уклонам в пределах от первых ‰ до сотен ‰.

Горные реки (по русловым процессам) – прерогатива их распространения в горных странах, где они сменяются полугорными во внутри- и межгорных впадинах и в предгорьях, где обычно происходит резкое уменьшение уклонов. При этом вследствие того, что продольные профили рек, приближаясь по мере своего развития к выработанным, имеют форму, описываемую зависимостями $IQ^m = \text{const}$ (Маккавеев, 1955) или, с учетом крупности наносов, $IQ^m d^n = \text{const}$ (Чалов, 2008), все большие и средние реки в горах являются полугорными и равнинными и только в верховьях горными. Вместе с тем на равнинных территориях малые реки, беря начало на возвышенностях и при поступлении в них галечно-валунного материала, тоже имеют горное русло.

Формирование русел горных рек во многом определяется чередованием по их длине участков с большими или относительно меньшими уклонами, составом горных пород, степенью их выветрелости и селевой деятельностью как на самих реках, обычно в их верховьях, так и на их притоках, поставляющих в русла огромное количество наносов, значительно превышающее их транспортирующую способность. Поэтому наряду с обычными морфодинамическими разновидностями русел (излучинами, разветвления-

ми, прямолинейными участками), но со спецификой, связанной с кинематикой потоков, для горных рек характерны специфические их проявления в виде аллювиальных полей и селевых русел, причем различия для рек, по которым проходят сели, и рек, в которые впадают селевые притоки, заключаются в создании на последних ступенчатости продольных профилей; присущими только горным рекам являются русла с неразвитыми аллювиальными формами руслового рельефа, порожисто-водопадные и скальные крутонаклонные «лотки», характерные для их верховьев, и скальные водопады (Чалов, 2008).

2. Водоносность рек и их водный режим (сезонные многолетние колебания стока воды) — основной активный фактор русловых процессов, в наибольшей степени зависящий от географических условий формирования стока и подчиняющийся географической зональности. Определяя мощность потока и возрастая вниз по течению, он обеспечивает закономерное изменение кинетичности, гидравлических характеристик и структуры потоков, морфометрических (ширина, глубина) и морфологических параметров русел, их форм и форм руслового рельефа (ряд разных размеров), а также, при прочих равных условиях, — интенсивность русловых деформаций, проявляющуюся в размывах берегов рек, смещении перекатов и других гряд, спрямлении излучин, периодичности развития рукавов разветвленных русел и т. д. При неизменном водном стоке, но в зависимости от растекания потока в многоводную фазу водного режима по пойме или его рассредоточения по рукавам и протокам происходят постоянные изменения удельной величины расхода воды: во врезанном беспойменном русле во все фазы режима поток сосредоточен в русле, на реках с широкопойменным руслом в многоводную фазу в нем остается от 90 до 30% расхода воды; на реках с разветвленным руслом доля стока в рукавах и протоках колеблется от первых процентов до 50%, разделяя в последнем случае поток на равные части, причем одновременно при затоплении береговой поймы и островов происходит еще большее снижение удельного расхода воды в русле. Это определяет реальное соотношение $\pi = aQ$, где π — параметры формы русел, Q — расход воды, a — коэффициент, зависящий от рассредоточенности потока по пойме разной ширины и степени разветвленности русла.

С другой стороны, зависимости параметров русла (излучин, разветвлений) неодинаковы на реках, различающихся по водному режиму. Для меандрирующих рек величина коэффициента k в формуле $r = kQ$ (r — радиус кривизны излучин) зависит от внутрigoдовой неравномерности стока

$k = f\left(\frac{Q_{cp}}{Q_{max}}\right)$ (Завадский, 2000). В разветвлениях размеры островов при одном и том же морфодинамическом типе русла оказываются различными при практически одинаковой водности во врезанном и широкопойменном русле. На средней Лене в первом случае параллельно-рукавные разветвления образованы большими островами с соотношением длины и ширины 1.5:1—5:1; во втором — многочисленными элементарными, малыми и средними островами, разделяющими основные рукава, вследствие чего их водность сокращается до 20—30%, тогда как остальная часть стока распределяется по второстепенным маловодным межостровным протокам.

В зависимости от водности равнинные реки, характеризуясь малыми уклонами (доли ‰) и чрезвычайно большим диапазоном водоносности (от ручьев до крупнейших рек), по русловым процессам разделяются на малые, у которых соотношение их ширины b_p и глубины h имеет соизмеримые или близкие величины (от 2:1 до 10—15:1), средние, большие и крупнейшие с соотношением b_p/h сотни и даже тысячи единиц (при $b_p = 10$ км и $h_{max} = 20$ м в межень $b_p/h = 1000$). Это определяет различную гидравлическую структуру потока и, как следствие, различные условия для образования и развития форм русла и руслового рельефа и их переформирования. Во-первых, при прочих равных условиях увеличение водности реки, сопровождающееся ростом b_p/h , обуславливает разделение потока на ветви течения. Согласно критерию квазиоднородности потока (Карасёв, 1975) $\theta = (b_p/h)\sqrt{\lambda}$ ($\lambda = 2g/C^2$ — коэффициент гидравлических сопротивлений, C — коэффициент Шези), при значении $\theta < 4.5$ поток имеет форму компактной струи и четко выраженную динамическую ось (стрежень), при $\theta > 4.5$ возникает широкая стрежневая зона, занимающая до 2/3 ширины русла, и при $\theta > 9.5$ поток разделяется на две и более ветвей, между которыми скорости потока меньше и создаются условия для аккумуляции наносов. При отсутствии их дефицита это приводит к развитию разветвлений, свойственных большим и крупнейшим рекам; на малых реках они проявляются при обмелении рек, сопровождающемся расширением русла и снижением глубины. Во-вторых, при образовании излучин на малых реках при соотношении $b_p/h < 15-20$ возникают винтообразные циркуляционные течения (Потапов, 1936; Львович, 1938; Маккавеев, 1955). На реках с $b_p/h > 15-20$ (средние и большие), а также в узлах разветвления и слияния рукавов «поперечная» циркуляция представляет собой отклонение донных струй потока от поверхностных в сторону

выпуклого берега, к берегу, противоположному оголовку острова, или к его ухвостью. Это обуславливает формирование на малых реках крутых петлеобразных излучин, у которых значения показателя формы r/h_n (r – радиус кривизны, h_n – стрела прогиба излучины) минимальные, увеличиваясь вниз по течению (Чалов и др., 2004).

В-третьих, на малых, средних и больших реках (на последних до $b_p = 1-1.5$ км при максимальной глубине плёсовых лощин 10–15 м от меженного уровня) формируются перекаты как единые гряды, как правило, соизмеримые с параметрами русла, пересекающие его от берега до берега. При больших значениях ширины русла перекаты состоят из двух или нескольких гряд, образующих самостоятельные побочки или осередки.

В-четвертых, в отличие от горных рек, являющихся только галечно-валунными, равнинные в этом отношении по составу наносов очень разнообразны – от песчано-илистых и песчаных до галечно-валунных в зависимости от геолого-геоморфологических условий формирования русел. При этом на галечно-валунных равнинных реках существуют только гряды-перекаты, соизмеримые с размерами русла, и их перемещение происходит только в многоводную фазу режима на расстоянии в пределах первых метров – 10–15 м/год. На реках с песчано-илистым руслом возможно безгрядовое движение наносов, поскольку в этом случае скорость потока $V \gg V_n$, т. е. больше неразмывающей для наносов данной крупности. Это обуславливает массовое взвешивание наносов, повышенную мутность потока и общий большой сток наносов при абсолютном преобладании стока взвешенных. На песчаных реках формируются гряды всех размеров от макро- до ультрамикромформ, причем при сезонной изменчивости водности и гидравлических характеристик потока происходит трансформация форм грядового движения наносов.

3. Геологическое строение территорий, по которым протекают реки, определяет различные условия формирования русел. В горных регионах абсолютно преобладают горные реки, по типу русловых процессов, и лишь большие реки являются равнинными, но во всех случаях галечными или галечно-валунными. На равнинных территориях реки почти исключительно равнинные, и лишь на возвышенностях в верховьях встречаются горные участки. Рыхлые (песчаные или галечно-валунные), пластичные или скальные (осадочные или кристаллические) грунты и их размываемость, горные массивы с чередованием узких ущелий при пересечении хребтов и внутригорных впадин, низменностей или возвышенностей, создающие изменения ширины

днищ долин, их периодические сужения и расширения, высоты и строения берегов, уклонов, крупности руслообразующих наносов – таков далеко не полный перечень геолого-геоморфологических факторов, определяющих проявление русловых процессов как следствие взаимодействия потока и русла. С ними связаны свободные и ограниченные условия развития русловых деформаций и формирование соответствующих им врезанных (ширина поймы $B_n < b_p$ или пойма отсутствует) и широкопойменных русел ($B_n > 6-7b_p$ на малых, $B_n > 2-3b_p$ на средних и больших реках). Ширина врезанных русел при неизменности величины стока колеблется в пределах до 2–3 раз, что соответствует или стеснению потока, увеличению скорости и повышению его транспортирующей способности, или снижению данных параметров, формированию прирусловых отмелей и разветвлений. У широкопойменных русел ширина поймы иногда превышает ширину русла в 20–30 раз, вызывая растекание потока при ее затоплении и снижая удельные значения русловой составляющей расхода воды. Это способствует на малых реках активному меандрированию с образованием очень крутых петлеобразных излучин, на больших – либо идет формирование раздвоенных русел на большом их протяжении (на Оби это почти весь широтный участок среднего течения от г. Нижневартовска до слияния с Иртышом и более чем 300-километровый участок нижней Оби, где ширина поймы достигает 60 км при суммарной ширине обоих рукавов 3–4 км), либо, несмотря на высокую водоносность, при которой обычно реки разветвляются на рукава (р. Лена в пределах Центрально-Якутской низменности, где $B_n = 2-2.5b_p$ при $b_p = 10-26$ км), формируются излучины, лишь осложненные островами в привершинных частях или на их крыльях (нижний Иртыш, средняя Обь между устьем р. Томи и г. Нижневартовском). Промежуточное положение между врезанными и широкопойменными занимают адаптированные русла, у которых $b_p < B_n < 2-3(6-7)b_p$ на больших и малых (показатель в скобках) реках. Они обычно свойственны рекам, протекающим в предгорьях, на склонах возвышенностей, сложенных пластичными грунтами, в сужениях долин.

В зависимости от состава грунтов, слагающих русла рек и их берега, а иногда и их водосборную площадь, находится сток наносов – его дефицит, при котором реки имеют коренное (часто скальное) ложе (таковы многие реки Средней и Восточной Сибири – Ангара, Подкаменная Тунгуска и Нижняя Тунгуска, Витим, верхний Алдан) или величину стока, превышающую транспортирующую способность потока, что обуславливает направленную

аккумуляцию наносов (Хуанхэ, Янцзы, Амударья, Терек в нижнем течении), или близкую к ней, вследствие сего в русле развиты обширные прирусловые отмели (побочни, осередки), которые при обсыхании в межень составляют до $2/3$ – $3/4$ ширины русла в пойменных бровках (р. Лена в среднем и нижнем течении — выше и ниже устья р. Алдан, реки севера Западной Сибири — Таз, Пур, Надым и их притоки, левые притоки нижнего Енисея). В первом случае формирование стока наносов происходит в пределах территорий, сложенных лёссами или лёссовидными суглинками, обеспечивающими абсолютное преобладание стока взвешенных наносов; во втором — реки протекают по низменностям, сложенным песчаными отложениями разного генезиса (морские, речные, флювиогляциальные), благодаря которым сток влекомых наносов составляет до 40–60% общего стока наносов.

При расположении рек в горных регионах или при пересечении структурных или моренных возвышенностей руслообразующими являются галечно-валунные наносы, обеспечивая высокую устойчивость врезанных русел и, соответственно, очень низкие деформации, которые проявляются на протяжении исторических или геологических отрезков времени. Наоборот, реки с песчаными или песчано-илистыми наносами имеют слабоустойчивые или неустойчивые русла с очень интенсивными деформациями, и их переформирования сказываются в изменении форм русел и их параметров практически ежегодно.

4. Сток наносов — один из активных ведущих факторов русловых процессов — имеет двойственный генезис в зависимости от его бассейновой и русловой составляющих. Первая определяется работой водных потоков на территории водосборной площади (эрозионные процессы) и другими денудационными процессами на склонах, поставляющих продукты их деятельности в реки. На равнинных реках это в основном взвешенные наносы, которые лишь при относительно высокой крупности являются руслообразующими, но находятся в потоке во взвеси, создавая условия для снижения размывающих скоростей и повышения эрозионной способности потока. На горных реках со склонов в русло поступает в основном материал осыпей и обвалов, создающий галечно-валунные, исключительно руслообразующие наносы, которые, перемещаясь потоком по скальному ложу, играют существенную корродирующую роль в эрозионном воздействии на него.

Русловая составляющая стока наносов формируется благодаря размыву берегов и дна рек, т. е. русловым деформациям, и представлена русло-

образующими наносами. При размыве берегов, сложенных лёссами или лёссовидными отложениями, а также пойменными фациями аллювия или мелкопесчаными илистыми грунтами, поток насыщается взвешенными наносами, мутность воды возрастает. При этом доля стока влекомых наносов сокращается, хотя абсолютные его значения не уменьшаются, а иногда даже увеличиваются.

Большое значение имеет соотношение влекомых и взвешенных наносов в их общем стоке. Преобладание последних, которые в этом случае являются руслообразующими, обычно определяет очень слабую устойчивость или неустойчивость русел, их интенсивные деформации и, в основном, направленную аккумуляцию наносов. Значительная доля влекомых наносов — причина формирования обширных прирусловых отмелей, обсыхающих в межень и способствующих активизации меандрирования благодаря формированию побочной у выпуклых берегов излучин, разветвлений из-за образования осередков или побочного, относительно прямолинейного русла, характеризующегося смещением вдоль русла перекаатов, создавая при этом в поперечном сечении периодические сужения (у побочной) или расширения (на седловинах перекаатов) русла (Россинский, Кузьмин, 1947; Петровский, Сахарова, 1954).

Дефицит наносов, особенно свойственный врезанным руслам, формирующимся в скальных кристаллических грунтах, обуславливает их развитие, в наибольшей мере контролируемое литологией или геолого-тектоническим строением территорий. Русла малых равнинных рек первых порядков, которые еще не приобрели достаточный сток наносов с бассейна или вследствие размыва берегов, также являются пассивно приспособленными к литогенной основе или относительно прямолинейными, врезанными, либо имеющими унаследованную пойму. Вниз по течению по мере увеличения стока наносов они становятся широкопойменными, меандрирующими, если не сохраняется их врезанный характер, но уже по другим причинам.

Во врезанном русле дефициту наносов способствуют большие уклоны, стеснение русла коренными породами, почти 100%-ное сосредоточение потока в русле при отсутствии поймы (имеются только бичевники у подножья склонов) и т. д. При выходе реки в предгорья или на равнину, в меж- и внутригорные впадины при неизменности ее водности происходит расширение самого русла, оно становится широкопойменным, уменьшаются, иногда очень резко, уклоны, в результате чего снижается транспортирующая способность потока, и при той же величине стока наносов он оказывается

соответствующим ей или превышающим её. Это приводит к изменению условий транспорта наносов, которые во врезанном русле переносились транзитом или во взвешенном состоянии, формируя только прибрежные дефицитные гряды (Дебольский, Котков, 1977), в новых условиях наносы создают аккумулятивный грядовой русловой рельеф, формируют морфологически сложные разветвления или на полугорных реках аллювиальные поля.

Галечно-валунные русла, как на горных, так и на равнинных реках, образуют гряды только одного порядка — макроформы (на горных реках — антидюнной формы) в соответствии с очень узким диапазоном скоростей, обеспечивающим перемещение гальки и валунов во время паводков и половодий, и при их снижении формирование аллювиальной отмости. На песчаных равнинных реках перемещение наносов происходит во все фазы водного режима и в условиях турбулентной структуры потока обеспечивает их движение в виде гряд. Н.И. Алексеевский (1998) выделил 5 категорий гряд по их размерам, присвоив им буквенные индексы — А, Б, В, Г, Д, из них в межень формируются и перемещаются только относящиеся к микроформам — Г и Д.

Величина стока наносов, соотношение в нем влекомой и взвешенной составляющих определяют форму поперечного сечения русла и его морфометрические параметры: относительная ширина русла $\sqrt{b_p}/h = \Gamma$ (морфометрический параметр В.Г. Глушкова) находится в прямой зависимости от удельной концентрации влекомых наносов в потоке $s_{вл}$ (кг/м³) (аналог его мутности в отношении взвешенных наносов) (Резников, 2007). Рост параметра Γ связан с относительным обмелением русла при увеличении стока наносов и их грядовым смещением, вызывающим увеличение ширины русла при одинаковой водности. Напротив, уменьшение $s_{вл}$ приводит к относительному углублению и сужению русла. Аналогично изменяется гидролого-морфологический параметр К.И. Гришанина (1972) $M = h(gb_p)^{0.25}/Q^{0.5}$, который при $M < 0.75$ свидетельствует о преобладании размыва русла ($W_{тр} > W$, дефицит влекомых наносов), при $M > 1.5$ — об аккумуляции наносов ($W_{тр} < W$).

5. Вертикальные русловые деформации, проявляющиеся в понижении/повышении отметок дна рек, с одной стороны, представляют собой направленный (общий, фоновый) процесс развития продольного профиля реки, сказывающийся в морфологии русел на протяжении исторических и геологических масштабов времени и, с этой точки зрения, рассматриваются как фактор русловых процессов; с другой стороны, они являются следствием либо горизонтальных переформирований русел, сопровождающихся

местным их врезанием или аккумуляцией наносов при спрямлении или развитии излучин, углублении и обмелении рукавов при перераспределении стока между ними и т. д., либо текущих, сезонных и многолетних деформаций перекатов, приводящих к постоянному изменению морфологического строения, смещению побочней, углублению или обмелению седловины перекатов, развитию побочневых и межосерёдковых проток и т. д.

Темпы направленных вертикальных деформаций на порядки величин меньше связанных с переформированиями русла или режимом перекатов, характеризуясь в естественных условиях скоростями в миллиметры — первые сантиметры в год (максимальная величина врезания — 35 см/год была зафиксирована на р. Алабуге на Тянь-Шане (Панин и др., 1990), направленная аккумуляция наносов +10 см/год на р. Хуанхэ (Чалов и др., 2000)). Проявлением этих деформаций являются баланс наносов $W_1 - W_2 = \pm \Delta W$ и соотношение стока наносов и транспортирующей способности потока $W_{тр} > W$ или $W_{тр} < W$, изменения положения кривой зависимости уровней H от расходов воды $Q = f(H)$ и кривых соответственных уровней $H_1 \sim H_2$ за многолетний период, превышающий продолжительность врезания или аккумуляции, вызванных местными деформациями русла. Проявляясь, в первую очередь, в развитии продольного профиля реки и формировании речных террас (Маккавеев, 1955; Маккавеев и др., 1968; Чалов, 2002; Сидорчук, 2025) в исторических и геологических масштабах времени, они имеют определенные признаки в морфологии и рельефе поймы (Маккавеев, Чалов, 1963, 1964; Чалов, 2009). Выраженность последних зависит от величины стока наносов, устойчивости русла, сложности и направленности русловых деформаций, особенно на реках с широкопойменным руслом. Врезанию рек обычно соответствует формирование врезанных русел — врезанные излучины, скульптурные и скульптурно-аккумулятивные (с коренным цоколем) острова разветвленных русел, пороги, шивера и другие скальные выступы в русле. Однако в отдельных случаях врезанное русло как морфологический тип может находиться в условиях направленной аккумуляции наносов. Таково русло нижнего Амура, где река пересекает северные отроги хребта Сихотэ-Алинь, в пределах которого все притоки Амура характеризуются приустьевыми разливами, образовавшимися вследствие их подпруживания прибрежными накоплениями наносов в главной реке (Чалов, Махинов и др., 2025). Второй пример — устьевая область Северной Двины (ниже слияния с р. Пинегой), где островные массивы (междукавья) раздвоенного русла Холмогорского

участка реки представлены высокими террасами с коренным скальным цоколем (Чалов, Голубцов и др., 2025).

На реках с широкопойменным руслом врезание и аккумуляция проявляются в трансгрессивном или регрессивном смещении островов, формирующихся в активной зоне русла (Маккавеев, 1948; Чалов, Голубцов, 2025), ступенчатости поймы, ее одноярусности или обвалованности с подтоплением грунтовыми водами пониженных участков и образованием соров (приустьевых разливов) на притоках, слабом развитии маловодных пойменных проток (например, на врезающейся средней и нижней Лене) и очень сильной расчлененности поймы пойменной многорукавностью (нижняя Обь). При этом в самих руслах морфологические признаки вертикальных направленных деформаций в значительной мере затушевываются при большом стоке наносов, высокой доле их влекомой составляющей, в определенных условиях (например, при переходе от врезанного русла к широкопойменному) с изменением формы транспорта наносов — от транзитного сплошного безгрядового к грядовому, с местными, в основном временными проявлениями врезания или аккумуляции наносов.

6. Морфодинамические типы русел (горизонтальные русловые деформации) — одна из основных форм проявления русловых процессов, которая иногда представляется как определение самого понятия «русловые процессы» (Кондратьев и др., 1982). Каждый тип русла характеризуется свойственной ему гидравлической структурой потока (скоростным полем, циркуляционными течениями) и определенными механизмами развития. В полной мере это проявляется в свободных условиях развития русловых деформаций (широкопойменные русла), в которых «поток управляет руслом» (Великанов, 1958), и обратное соотношение («русло управляет потоком») возникает, когда в процессе взаимодействия создается та или иная форма русла (излучины, разветвления и т. д.) с соответствующей ей структурой потока. В ограниченных условиях в областях распространения скальных пород врезанные русла, в которых изначально «русло управляет потоком», их форма (излучины или прямолинейное) определяются геологической структурой территории (разломы, зоны трещиноватости и пр.), острова имеют коренной цоколь, являясь скульптурными или скульптурно-аккумулятивными; в пластичных и полускальных грунтах врезанные русла наследуют при врезании рек в течение геологических отрезков времени формы широкопойменного русла, созданные рекой в начальный период ее существования, но их параметры соответствуют эпохам

максимального стока. В обоих случаях врезанные излучины и прямолинейные русла отличаются повышенной или абсолютной устойчивостью, и только в разветвлениях врезанного русла происходят рассредоточение стока по рукавам и его изменения, сопровождающиеся деформациями русел, особенно при их формировании в пластичных или полускальных грунтах, и вследствие грядового перемещения наносов (периодического надвигания побочней на заходы в рукава).

Основные типы русла — излучины (соответствующий им процесс — меандрирование), разветвления и относительно прямолинейные, неразветвленные. Гидродинамическим условием их формирования являются: 1) неустойчивость прямолинейного движения потока; 2) увеличение критерия И.Ф. Карасёва (1975) $\theta = (b_p/h) \times \sqrt{\lambda}$, обуславливающего в конечном счете разделение потока на ветви течения; 3) гидравлическая выгодность извилистой формы русла из-за возникновения зон ускорения и замедления течения на его изгибах (в разветвленном русле острова обуславливают образование изгиба при обтекании их потоком); 4) наличие внешних условий и факторов, обуславливающих закрепление прямолинейности русла (ведущий коренной берег, малый сток наносов, интенсивное смещение прирусловых отмелей — побочней, осередков) (Чалов, 1979, 2011). Каждый тип русла, в свою очередь, имеет большое количество разновидностей (подтипов), различающихся параметрами (радиусы кривизны излучин и рукавов, степень развитости излучин, шаги излучин и разветвлений и т. д.), морфологией и характером деформаций, развитием на разных структурных уровнях (до 5–6) (Чалов, С. Чалов, 2020, 2022, 2025) и под воздействием местных условий их формирования (таковы вынужденные излучины при подходе потока к коренным берегам, прибрежные разветвления в периферических зонах русла). Чем выше структурный уровень меандрирования или разветвлений, тем сложнее морфология русел и их деформации: большие излучины, вершины которых находятся у противоположных бортов днища долины, осложнены прямолинейными «вставками», разветвлениями на их крыльях или имеют петлеобразную форму; рукава пойменно-русловых разветвлений и раздвоенное русло характеризуются своими морфодинамическими типами в зависимости от их размеров. Осложнения русла формами 2-го и 3-го порядка возможны практически на любом структурном уровне, создавая условия меандрирования рукавов или вторичных разветвлений на излучинах.

Зависимость меандрирования, разветвлений или развития прямолинейных русел от природных условий, водоносности и водного режима рек, стока наносов, геологического строения рельефа территории определяет географические закономерности распространения русел разного типа и создает условия для их картографирования по русловым процессам на реках в целом (Русловые процессы..., 1990, 1996; Морфология и динамика..., 1999; Голубцов, 2025; Чалов, Чалова, 2024), отдельно меандрирующих, разветвленных и прямолинейных русел с учетом многообразия их проявления (Чалов, Чалова, 2019, 2023; Чалов и др., 2024).

7. Грядовое движение наносов, возникающее как следствие турбулентной структуры речных потоков, является главным условием стока руслообразующих наносов, определяющих рельеф речных русел и его постоянные (текущие), сезонные или многолетние изменения. Будучи представленными грядами разных размеров — от ультрамикродо макроформ, соизмеримых с параметрами русла, — перекатов, их формирование и деформации зависят от стока и крупности наносов (песчаных или галечно-валунных), уклонов водной поверхности, изменяющихся в разные фазы водного режима, морфодинамического типа русла и его устойчивости, которая зависит от соотношения крупности наносов d_{cp} и уклонов $I\%$ (число Лохтина $L = d_{cp}/I$). Основной фон рельефа русел создают перекаты, которые пересекают русло как единая гряда от одного берега до другого или представляют собой две или несколько надвинувшихся друг на друга больших гряд-макроформ. В зависимости от условий формирования образуются перекатные участки, в которых деформация перекатов происходит сопряженно. При большом стоке наносов обсыхающие в межень части перекатов — побочники и осередки — по размерам превышают ширину межженного русла, создавая подобие аллювиальных полей, характерных для горных рек при их выходе из гор в предгорья. В меандрирующих руслах и в разветвлениях перекаты занимают постоянное положение, находясь на перегибах между смежными излучинами, в узлах разделения потока на рукава или при слиянии рукавов, подвергаясь при этом постоянным деформациям из-за смещения по ним гряд меньших размеров, их трансформации при смене фаз водного режима. Смещение перекатов, побочней, осередков и их продвижение на излучины и на узлы разветвления способствует активизации развития первых, перераспределению стока между рукавами и изменению условий транспорта наносов при увеличении/снижении гидравлических характеристик потока. Сезонный режим перекатов

заключается в их обмелении из-за аккумуляции наносов в одну фазу режима, размыва корыта переката в другую и изменении положения последнего в пределах седловины переката. На реках с галечно-валунными наносами при снижении уровня воды на спаде половодья перекаты образуют «водосливы с широким порогом», и глубины на них уменьшаются в большей степени, чем в целом по реке.

Плёсовые участки и транзитный перенос наносов без образования перекатов характерны для врезанных русел (прямолинейных и врезанных излучин), в которых формируются лишь прибрежные дефицитные гряды. На равнинных песчаных широкопойменных реках они возникают при расположении русла вдоль ведущих коренных берегов.

8. Поймы рек являются, с одной стороны, производной русловых процессов, формируясь в ходе горизонтальных русловых деформаций и представляя собой результат многолетних и вековых переформирований русла; во-вторых — важнейшим фактором русловых процессов благодаря регулированию стока при затоплении, аккумуляции стока взвешенных наносов на поверхности реки, возникновению кривой спада уровней в местах выхода воды на пойму и подпора при слиянии пойменного потока с русловым, сливу с поймы в русло осветленных вод и размывам пойменных берегов, поставляющих в русло наносы, превращению прирусловых отмелей (побочней, осередков) в участок поймы. Это дало основание для выделения пойменно-русловых комплексов как совокупности процессов формирования поймы и русла и их взаимодействия (Чернов, 2009).

Рельеф поймы (сегментно-гривистый, ложбинно-островной, параллельно-гривистый и др. (Попов, 1978; Чалов, 1979, 2008; Чернов, 2009)), сформировавшийся в течение длительных отрезков времени (в основном верхний плейстоцен — голоцен вплоть до настоящего времени), когда происходили неоднократные гидроклиматические изменения и, соответственно, трансформации форм русла, отражает состояние русла и его морфодинамику в период формирования пойм. Поскольку параметры русла зависят от характеристик водности рек, это позволяет выполнять палеогидрологический и палеорусловой анализ, определяя как происходящие за время формирования поймы изменения стока воды, так и особенности преобразования русла при его увеличении/уменьшении (Сидорчук и др., 2000; Сидорчук, Панин и др., 2000). Вместе с тем вертикальные русловые деформации (врезание или направленная аккумуляция наносов и их чередование во времени в связи с периодическими гидроклиматическими изменениями) приводят к ступенчатости или обвалованности пойм, в послед-

нем случае — к образованию наложенных пойм. Аккумуляция наносов на поверхности поймы при ее затоплении и образование пойменного наилка, состав и мощность которого зависят от удаленности поймы от русла, — процессы, которые в той или иной мере нивелируют первичный пойменный рельеф, а в прирусловой части поймы полностью его иногда перекрывают. На реках с разветвленным руслом и при наличии пойменной многорукавности это, а также вертикальные деформации и спрямление излучин, сопровождающиеся смещением русла во времени в пределах всего днища долины, создает сложные пространственные изменения высоты поймы, чередование повышенных и пониженных участков и, как следствие, сложный гидрологический режим поймы при ее затоплении.

9. Палеорусловой анализ на основе восстановления по рельефу поймы бывших за время ее формирования положений и морфологии русла позволяет придти к прогнозированию возможных трансформаций русла на отдаленные перспективы (многие десятилетия и столетия) при глобальных изменениях климата и водности рек. Имея гидролого-морфологические зависимости, связывающие параметры русла с показателями стока рек, можно давать прогнозные оценки при современных (текущих) гидроклиматических изменениях. Однако при этом следует учитывать степень интенсивности влияния антропогенных изменений на русла и факторы русловых процессов, которые нередко превышают по своим объемам русловые деформации, полностью их затушевывая. При этом и гидроклиматические изменения, и характер трансформации русла и руслового режима зависят от особенностей природных условий (водоносности рек, водного режима, стока наносов, геологического строения территории, рельефа и т. д.), в которых протекают реки и формируются их русла.

10. Русловые процессы как составная часть эрозионно-русловых систем (ЭРС) — одно из основных направлений географического русловедения, начало которому было положено Н.И. Маккавеевым (1955) в его классической монографии «Русло реки и эрозия в ее бассейне», а его современное состояние (на 2010-е гг.) получило отражение в коллективной монографии «Эрозионно-русловые системы» (2017). Русловые процессы — завершающее звено гидрологических процессов и явлений, связанное с воздействием водных потоков, от временных нерусловых до постоянных речных, на поверхность суши. Продукты эрозии почв и овражной эрозии на склонах в речных бассейнах поступают в реки, являясь важнейшим фактором формирования стока наносов. Взаимная

связь и взаимообусловленность проявления всех видов эрозионно-аккумулятивных процессов, сопряженность их развития во всех звеньях сети водных потоков обуславливают существование общих законов функционирования как временных нерусловых (хотя и развивающихся при рассредоточении склонового стока на микроручейковую сеть) и русловых (в овражно-балочной сети), так и постоянных речных потоков (Маккавеев, 1976; Эрозионно-русловые..., 2017). При этом процессы на водосборных бассейнах, ручьи, малые и средние реки в наибольшей степени подчинены географической зональности и местным, в основном связанным с геологическим строением и рельефом, природным условиям; в отличие от них, русловые процессы на больших и тем более крупнейших реках, пересекающих различные природные зоны и геоморфологические районы, по своему русловому и гидрологическому режиму являются транзитными. Кроме того, именно верхние звенья водных потоков, в том числе малые реки, подвержены антропогенному воздействию, связанному с вырубкой лесов, сельскохозяйственным, горнопромышленным и урбанизированным освоением территории, сказывающимися в состоянии русел малых рек, вызывающими их заиливание и деградацию.

В горных странах эрозионные процессы на склонах являются источником поступления в речную сеть в основном галечно-валунного материала. На равнинных территориях они в основном поставляют в реки взвешенные наносы, насыщенные биогенными элементами, которые аккумулируются на поймах при их затоплении в половодье и паводки, а при спаде уровней и на поверхности отмелей, благоприятствуя появлению на них растительности и превращению в элементы молодой поймы; в низовьях рек, где уклоны снижаются до минимальных размеров, взвешенные наносы становятся руслообразующими. Вместе с тем повышенный сток взвешенных наносов (мутность воды) является фактором повышения транспортирующей способности потоков, увеличения плотности воды и снижения величины размывающей скорости (Маккавеев и др., 1970; Россинский, Дебольский, 1980), что приводит к повышению стока влекомых наносов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представляя собой гидромеханическое явление, русловые процессы образуют различные морфодинамические типы русел, осуществляют их постоянные переформирования (русловые деформации), различные в зависимости от природных условий, в которых протекают реки (горные страны и равнин-

ные территории; тундра, тайга, степи; наличие или отсутствие мерзлоты и т. д.). Это определяет географическое направление в их изучении (географическое русловедение), которое в то же время опирается на законы гидродинамики, определяющие механизм самих русловых процессов. Основными его положениями являются разделения русел по условиям формирования и их морфодинамике: по кинетичности потока, уклону и форме транспорта наносов — на горные, полугорные и равнинные; по водоносности и водному режиму — на малые, средние, большие и крупнейшие, с одной стороны, и зональные, местные и транзитные, с другой; по соотношению стока наносов (его избытку или дефициту) и транспортирующей (эрозионной) способности потоков — на врезающиеся или аккумулирующие наносы; по свободным или ограниченным геолого-геоморфологическим условиям развития русловых деформаций — на врезанные, адаптированные и широкопойменные; по направленности вертикальных русловых деформаций — на врезающиеся или характеризующиеся направленной аккумуляцией наносов; по форме русел и характеру горизонтальных русловых деформаций — на меандрирующие, разветвленные на рукава и относительно прямолинейные и их различные сочетания; по особенностям грядового движения наносов — на перекатные и плёсовые, а при их дефиците в том числе на скальные и порожистые; в зависимости от эрозионных процессов на водосборной площади и бассейновой составляющей стока наносов, в том числе приводящей к заилению и деградации рек либо к дефициту в них наносов; по условиям формирования, морфологии и режиму пойм как производных русловых деформаций и фактором русловых процессов из-за их затопления и размывов берегов; по антропогенным (техногенным) трансформациям, происходящим при хозяйственном освоении речных ресурсов.

Результатом географического направления в исследованиях русловых процессов является составление карт русловых процессов на территорию России или ее отдельных регионов и речных бассейнов, специальных карт, отражающих опасность русловых процессов или гидро- и геоэкологические последствия русловых деформаций и антропогенного воздействия на реки. Знание и понимание природных (естественных) закономерностей руслоформирующей деятельности рек с учетом гидродинамики потоков обеспечивает прогнозирование русловых деформаций вследствие саморазвития русел, изменения гидроклиматических условий и антропогенного воздействия на факторы русловых процессов и непосредственно на русла рек.

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 и по проекту РНФ «Русловые процессы на реках России: ретроспективный анализ, морфодинамика русел и прогнозные оценки при гидроклиматических изменениях и антропогенных воздействиях» (№ 23-17-00065).

ЛИТЕРАТУРА

Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1998. 203 с.

Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л., Гидрометеоздат. 1988. 456 с.

Беркович К.М. Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. М.: ГЕОС. 2001. 164 с.

Бутаков Г.П., Назаров Н.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Условия формирования русел и русловые деформации на реках бассейна р. Камы // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2000. С. 138–148.

Великанов М.А. К постановке проблемы русловых процессов // Метеорология и гидрология. 1946. № 1. С. 36–46.

Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат. 1958. 395 с.

Гладков Г.Л., Чалов Р.С., Беркович К.М. Гидроморфология русел судоходных рек. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова. 2016. 432 с.

Голубцов Г.Б., Чалова Е.Р. Морфология и динамика русел рек Гыданского полуострова и их картографирование // Вест. Удмурт. ун-та. Биология. Науки о Земле. 2025. Т. 35. № 2.

Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт. 1972. 216 с.

Дебольский В.К., Котков В.М. Особенности динамики дефицитных форм в поступательных потоках // Метеорология и гидрология. 1977. № 10. С. 67–71.

Завадский А.С. Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования русел равнинных рек. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2001. 27 с.

Карасёв И.Ф. Русловые процессы при переброе стока. Л.: Гидрометеоздат. 1975. 288 с.

Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В., Пинковский С.И., Фёдоров Н.Н., Якунин И.А. Русловой процесс. Л.: Гидрометеоздат. 1959. 372 с.

- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
- Куракова А.А., Чалов Р.С., Чалова Е.Р. Новые данные о руслоформирующих расходах воды на реках России // Метеорология и гидрология. 2025. № 4. С. 76–86.
- Лежневский Н.С. О речных течениях и формировании речного русла // Тр. 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб.: 1893 (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат. 1948. С. 18–36).
- Лохтин В.М. О механизме речного русла. СПб.: 1897 (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат. 1948. С. 23–59).
- Львович М.И. Русловые процессы и золотонность участка р. Сугор // Тр. Треста «Золоторазведка» и ин-та НИГРИЗолото. 1938. № 8. С. 169–185.
- Маккавеев Н.И. Регрессивные переформирования речных островов // Метеорология и гидрология. 1948. № 4. С. 44–50.
- Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат. 1949. 202 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 347 с.
- Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 116 с.
- Маккавеев Н.И. Общие закономерности эрозионно-русловых процессов // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 10. Русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат. 1976. С. 8–12.
- Маккавеев Н.И., Литвин Л.Ф., Хмелева Н.В. Использование транспортирующей способности речного потока в практических целях // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1970. № 2. С. 82–89.
- Маккавеев Н.И., Мандыч А.Ф., Чалов Р.С. Влияние восходящего развития рельефа на глубинную эрозию и твердый сток рек Западной Грузии // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1968. № 4. С. 52–58.
- Маккавеев Н.И., Советов В.С. Трассирование землечерпательных прорезей на перекатах равнинных рек Европейской части СССР // Тр. ЦНИИРФ. Вып. 3. Вопросы пути. 1940. 60 с.
- Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В., Зайтов И.Р., Лебедева Н.В. Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1961. 196 с.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. О морфологических признаках современной аккумуляции в речных долинах // Изв. АН СССР. Сер. географ. 1963. № 3. С. 84–89.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. О развитии рельефа поверхности речных террас и признаки глубинной эрозии на примере верхней Оби // Изв. АН СССР. Сер. географ. 1964. № 4. С. 120–125.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1986. 264 с.
- Махинов А.Н., Лю Шугуан. Формирование рельефа русел и берегов рек. Хабаровск: ДВО РАН. 2013. 173 с.
- Морфология и динамика русел рек Европейской части России и сопредельных государств. Масштаб 1: 2000000. Фед. служба геодезии и картографии РФ. 1999. 4 л.
- Назаров Н.Н., Егоркина С.С. Реки Пермского края. Горизонтальные русловые деформации. Пермь: Звезда. 2004. 156 с.
- Ободовский О.Г. Руслові процеси. Київ: ВПЦ «Київський ун-т». 2017. 511 с.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Катастрофические скорости формирования флювиального рельефа // Геоморфология. 1990. № 2. С. 3–11.
- Петровский В.В., Сахарова Е.И. О переформированиях Красноборского переката (Северная Двина) // Русловые исследования для улучшения условий судоходства. М.: Речной транспорт. 1958. С. 19–23.
- Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат. 1965. 328 с.
- Потапов М.В. Винтовое движение жидкости в прямом открытом канале прямоугольного сечения // Поперечная циркуляция в открытом потоке и её гидротехническое применение. М.: Сельхозиздат. 1936. С. 102–154.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках / Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт. 1964. 262 с.
- Резников П.Н. Сток наносов и его проявления в морфодинамике речных русел. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2007. 23 с.
- Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука. 1980. 216 с.
- Россинский К.И., Кузьмин И.А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел // Проблемы регулирования речного стока. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1947. С. 88–129.
- Русловые процессы на реках Алтайского края. Масштаб 1:1000000. М.: ГУГК СССР. 1991. 1 л.
- Русловые процессы на реках СССР. Масштаб 1:4000000. М.: ГУГК СССР. 1990. 4 л.
- Рысин И.И., Петухова Л.И. Русловые процессы на реках Удмуртии. Ижевск: Научная книга. 2006. 176 с.
- Середовских Б.А. Гидроморфология реки Конды. Ретроспективный анализ динамики изменений русла. Нижневартовск: НВГУ. 2022. 155 с.

- Сидорчук А.Ю. Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеиздат. 1992. 128 с.
- Сидорчук А.Ю. Процессы формирования продольного профиля реки // Геоморфология и палеогеография. 2025. Т. 56. № 2. С. 185–196.
- Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Панин А.В. Поздневалдайские палеоруслы рек Русской равнины // Изв. РАН. Сер. географ. 2000. № 6. С. 73–78.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Чернов А.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н. Сток воды и морфология русел рек Русской равнины в поздневалдайское время и в голоцене (по данным палеоруслowego анализа) // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2000. С. 196–231.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Горные реки и реки в горах: продольный профиль, морфология и динамика русел // Геоморфология. 2002. № 3. С. 26–40.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования русел. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 608 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД. 2011. 960 с.
- Чалов Р.С. Географическое направление в изучении русловых процессов (основы географического русловедения) // Вопросы географии. Сб. 133. Географо-гидрологические исследования. М.: Кодекс. 2012. С. 72–94.
- Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М. 2017. 569 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД. 2019. 640 с.
- Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.
- Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Куракова А.А., Семаков В.А., Панченко Е.Д. Морфодинамика русла р. Северной Двины, его естественные и техногенные трансформации в XX – начале XXI века // Изв. РГО. 2025. Т. 157. № 3. С. 317–339.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2004. 371 с.
- Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: МГУ. 2000. 212 с.
- Чалов Р.С., Махинов А.Н., Чернов А.В., Иванов В.В. Вертикальные деформации на среднем и нижнем Амуре и их отражение в морфологии русла и поймы // Эрозия почв и русловые процессы. 2025. № 2. С. 18–32.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 269–271.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р. Дискретные свойства русловых процессов и их отражение в морфодинамике речных русел // Изв. РАН. Сер. географ. 2023. Т. 87. № 2. С. 234–249.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни меандрирования речных русел и морфодинамическая классификация излучин // Изв. РАН. Сер. географ. 2025. Т. 88. № 4. С. 539–555.
- Чалов Р.С., Чалова Е.Р. География русел рек, разветвленных на рукава, на территории России // Изв. РАН. Сер. географ. 2019. Т. 151. № 6. С. 20–34.
- Чалов Р.С., Чалова Е.Р. Географические закономерности меандрирования русел рек России // География и природные ресурсы. 2023. № 3. С. 13–24.
- Чалов Р.С., Чалова Е.Р. Русловые процессы на реках полуострова Ямал и их картографирование // Вест. Удмурт. ун-та. Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34. Вып. 3. С. 308–314.
- Чалов Р.С., Чалова Е.Р., Голубцов Г.Б. География прямолинейных неразветвленных русел и условия их формирования // Изв. РАН. Сер. географ. 2024. Т. 88. № 4. С. 496–507.
- Чернов А.В. География и экологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М.: Крона. 2009. 654 с.
- Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Тр. Геол. ин-та АН СССР. Сер. геологич. № 55. 1951. 275 с.
- Шэй Юйчан, Гун Гоюань. Речная геоморфология. Пекин: Наука. 1986 (на китайском языке).
- Эрозионно-русловые системы. М.: ИНФРА-М. 2017. 702 с.
- Babiński Z. Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych. Bydgoszcz. 2002. 186 s.

ОБ АВТОРЕ

Чалов Роман Сергеевич, профессор, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, rschalov@mail.ru

THE CURRENT STATE OF THE GEOGRAPHIC-HYDROLOGICAL APPROACH IN THE STUDY OF CHANNEL PROCESSES (GEOGRAPHICAL CHANNEL STUDY): THEORY AND METHODOLOGY

R.S. Chalov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

rschalov@mail.ru

Abstract. The paper represents the analysis of the geographic-hydrological approach in the study of river channel formation conditions, their morphology and dynamics. It provides a historical overview and assesses the role of N.I. Makkaveev in the creation of the study and associated scientific school. It substantiates the importance of the geographic-hydrological approach in the development of the theory of channel processes (channel studies) and the solution of related applied problems. Its relationship with the hydromorphological theory of channel processes (GGI), hydrodynamic and hydraulic engineering approaches is demonstrated. The following base contributions of the channel processes study are considered in detail: mechanisms and forms of manifestation of channel processes on lowland, semi-mountain and mountain rivers; river runoff and water regime as leading factors of channel processes (small and large rivers); geological and geomorphological conditions of channel formation (free and limited development of channel changes); sediment flow and composition; vertical channel deformations (incision and accumulation of sediments); morphodynamic types of channels, their diversity and their evolution; ridge movement of sediments and formation of channel bottom relief; river floodplains both as product and factor of channel processes; paleochannel analysis and forecasting of channel changes under hydroclimatic changes and anthropogenic impacts; channel processes as a component of erosion-fluvial systems.

Keywords: channel processes; mountain and lowland, large and small rivers; free and limited conditions of channel changes; channel morphodynamics; riffles and rapids; river floodplains; paleochannel analysis

ACKNOWLEDGEMENTS

Carried out according to the plans of the Research (GR) of the Research Laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes named after N.I. Makkaveev and the Department of Land Hydrology of Lomonosov Moscow State University and the project of the RNF “Channel processes on the rivers of Russia: retrospective analysis, morphodynamics of channels and forecast estimates under hydroclimatic changes and anthropogenic impacts” (No. 23-17-00065).

ABOUT THE AUTHOR

Chalov Roman Sergeevich, Professor, Doctor of Geography, Professor of the Department of Terrestrial Hydrology, Principal Scientist of the Research Laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes named after N.I. Makkaveev of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University, rschalov@mail.ru

REFERENCES

Alekseevsky N.I. River sediments formation and movement. Moscow, the MSU Publishers. 1998. 203 p.

Babinski Z. The influence of dams on channel processes of alluvial river. Bydgoszcz. 2002. 186 p.

Baryshnikov N.B., Popov I.V. Dynamics of channel flows and channel processes. Leningrad, Gidrometeoizdat. 1988. 456 p.

Berkovich K.M. Geographical analysis of anthropogenic changes in channel processes. Moscow, GEOS. 2001. 164 p.

Butakov G.P., Nazarov N.N., Chalov R.S., Chernov A.V. Conditions of river channel formation and channel changes in the Kama River basin // Ehroziionnye i ruslovyie processy. Issue 3. Moscow, the MSU Publishers. 2000. P. 138–148.

Chalov R.S. Channel processes (Riverbed Science). Moscow, INFRA-M. 2017. 569 p.

Chalov R.S. Geographical direction in the study of channel processes (fundamentals of geographical channel studies) // Voprosy geografii. Collection 133. Geographical-hydrological studies. Moscow, KOD-EKS. 2012. P. 72–94.

Chalov R.S. Geographical studies of channel processes. Moscow, the MSU Publishers. 1979. 232 p.

Chalov R.S. Mountain rivers and rivers in the mountains: longitudinal profile, morphology and channel dynamics // Geomorfologiya. 2002. No. 3. P. 26–40.

Chalov R.S. Riverbed Science: theory, geography, practice. Vol. 1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and river channel formation conditions. Moscow, the LKI Publishers. 2008. 608 p.

- Chalov R.S. Riverbed Science: theory, geography, practice. Vol. 2. Morphology and development of river channels. Moscow, KRASAND. 2011. 960 p.
- Chalov R.S. Riverbed Science: theory, geography, practice. Vol. 3. Human impacts, hazardous manifestations and management of channel processes. Moscow, KRASAND. 2019. 640 p.
- Chalov R.S., Alabyan A.M., Ivanov V.V., Lodina R.V., Panin A.V. Morphodynamics of lowland river channels. Moscow, GEOS. 1998. 288 p.
- Chalov R.S., Chalov S.R. Discrete properties of channel processes and their reflection in river channel morphodynamics // *Izvestiya RAS. Series geographical*. 2023. Vol. 87. No. 2. P. 234–249.
- Chalov R.S., Chalov S.R. Structural levels and morphodynamic classification of braided channels // *Water resources*. 2020. Vol. 47. No. 3. P. 269–271.
- Chalov R.S., Chalov S.R. Structural levels of meandering river channels and morphodynamic classification of river bends // *Izvestiya RAS. Series geographical*. 2025. Vol. 88. No. 4. P. 539–555.
- Chalov R.S., Chalova E.R. Channel processes on the Yamal Peninsula rivers and their mapping // *Vestnik of the Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. 2024. Vol. 34. Issue 3. P. 308–314.
- Chalov R.S., Chalova E.R. Geographical patterns of meandering river channels of Russia // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2023. No. 3. P. 13–24.
- Chalov R.S., Chalova E.R. Geography of braided channels on the territory of Russia // *Izvestiya RAS. Series geographical*. 2019. Vol. 151. No. 6. P. 20–34.
- Chalov R.S., Chalova E.R., Golubtsov G.B. Geography of straight unbraided channels and conditions of their formation // *Izvestiya RAS. Series geographical*. 2024. Vol. 88. No. 4. P. 496–507.
- Chalov R.S., Golubtsov G.B., Kurakova A.A., Semakov V.A., Panchenko E.D. Morphodynamics of the Severnaya Dvina River channel, its natural and antropogenic transformations in the 20th – early 21st centuries // *Izvestiya of the Russian Geographical Society*. 2025. Vol. 157. Issue 3. P. 317–339.
- Chalov R.S., Liu Shuguang, Alekseevsky N.I. Sediment runoff and channel processes on large rivers of Russia and China. Moscow, the MSU Publishers. 2000. 212 p.
- Chalov R.S., Makhinov A.N., Chernov A.V., Ivanov V.V. Vertical channel deformations on the middle and lower Amur River and their reflection in channel and floodplain morphology // *Ehroziya pochv i ruslovyje processy*. 2025. No. 2. P. 18–32.
- Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Panin A.V. River meanders. Moscow, the MSU Publishers. 2004. 371 p.
- Channel processes of the Altai Region rivers. Scale 1:1000000. Moscow, State Administration of Geodesy and Cartography of the USSR. 1991. 1sh.
- Channel processes of the USSR rivers. Scale 1:4000000. Moscow, State Administration of Geodesy and Cartography of the USSR. 1990. 4 sh.
- Chernov A.V. Geography and ecological state of river channels and floodplains of the Northern Eurasia. Moscow, Krona. 2009. 654 p.
- Debolsky V.K., Kotkov V.M. Features of the dynamics of deficient forms in progressive flows // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1977. No. 10. P. 67–71.
- Design of navigation passes on free rivers / Proceedings of the Central Research Institute of Economics and Transport Technologies. Issue 36. Moscow, Transport. 1964. 262 p.
- Fluvial-channel systems. Moscow, INFRA-M. 2017. 702 p.
- Gladkov G.L., Chalov R.S., Berkovich K.M. Channel hydromorphology of the navigable rivers. St. Petersburg, the Publishers of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2016. 432 p.
- Golubtsov G.B., Chalova E.R. Morphology and dynamics of river channels of the Gydan Peninsula and their mapping // *Vestnik of the Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. 2025. Vol. 35. No. 2.
- Grishanin K.V. Theory of the channel process. Moscow, Transport. 1972. 216 p.
- Karasev I.F. Channel processes under river flow transfer. Leningrad, Gidrometeoizdat. 1975. 288 p.
- Kondratiev N.E., Lyapin A.N., Popov I.V., Pinkovskiy S.I., Fedorov N.N., Yakunin I.A. The channel process. Leningrad, Gidrometeoizdat. 1959. 372 p.
- Kondratiev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Fundamentals of hydromorphological theory of the channel process. Leningrad, Gidrometeoizdat. 1982. 272 p.
- Kurakova A.A., Chalov R.S., Chalova E.R. New data on channel-forming water discharge on Russian rivers // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2025. No. 4. P. 76–86.
- Lelyavsky N.S. River currents and formation of river channels // Proceedings of the 2nd Congress of Hydraulic Engineers, 1893. St. Petersburg. 1893 (Issues of hydraulic engineering on free rivers. Moscow, Rechizdat. 1948. P. 18–36).
- Lohtin W.M. The mechanism of river channel. St. Petersburg. 1897 (Issues of hydraulic engineering on free rivers. Moscow, Rechizdat. 1948. P. 23–59).
- Lvovich M.I. Channel processes and gold content of the river Sugor reach // Proceedings of the Trust “Zolotorazvedka” and Institute NIGRIZoloto. 1938. No. 8. P. 169–185.
- Makhinov A.N., Liu Shuguang. Formation of river channel relief and banks. Khabarovsk: Far Eastern Branch of the RAS. 2013. 173 p.
- Makkaveev N.I. General patterns of erosion-channel processes // Proceedings of the IV All-Union Hydro-

- logical Congress. Vol. 10. Channel processes. Leningrad, Gidrometeoizdat. 1976. P. 8–12.
- Makkaveev N.I. Regressive transformations of river islands // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1948. No. 4. P. 44–50.
- Makkaveev N.I. River channel and erosion in its basin. Moscow, The Publishers of the USSR Academy of Sciences. 1955. 347 p.
- Makkaveev N.I. River channel regime and tracing of dredged channels. Moscow, Rechizdat. 1949. 202 p.
- Makkaveev N.I. Water flow and channel processes. Moscow, the MSU Publishers. 1971. 116 p.
- Makkaveev N.I., Chalov R.S. Channel processes. Moscow, the MSU Publishers. 1986. 264 p.
- Makkaveev N.I., Chalov R.S. Development of the surface relief of river terraces and signs of deep channel erosion, case study of the upper Ob' River // *Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. Series geographical*. 1964. No. 4. P. 120–125.
- Makkaveev N.I., Chalov R.S. Morphological features of modern accumulation in river valleys // *Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. Series geographical*. 1963. No. 3. P. 84–89.
- Makkaveev N.I., Khmeleva N.V., Zaitov I.R., Lebedeva N.V. Experimental geomorphology. Moscow, the MSU Publishers. 1961. 196 p.
- Makkaveev N.I., Litvin L.F., Khmeleva N.V. Using the transport capacity of river flow for practical purposes // *Vestnik of the Moscow University. Series 5. Geography*. 1970. No. 2. P. 82–89.
- Makkaveev N.I., Mandych A.F., Chalov R.S. The influence of ascending relief development on deep channel erosion and sediment runoff of rivers in Western Georgia // *Vestnik of the Moscow University. Series 5. Geography*. 1968. No. 4. P. 52–58.
- Makkaveev N.I., Sovetov V.S. Tracing dredging cuts on the riffles of lowland rivers in the European part of the USSR // *Proceedings of the Central Research Institute of Russian Federation. Issue 3. Navigation questions*. 1940. 60 p.
- Morphology and dynamics of river channels in the European part of Russia and neighboring countries. Scale 1: 2000000. Federal Service of Geodesy and Cartography of Russia. 1999. 4 sheets.
- Nazarov N.N., Egorkina S.S. Rivers of the Perm region. Horizontal channel deformations. Perm', the Publ. Zvezda 2004. 156 p.
- Obodovsky O.G. Channel processes. Kiev, VPC "Kiev University". 2017. 511 p.
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chalov R.S. Catastrophic rates of fluvial relief formation // *Geomorfologiya*. 1990. No. 2. P. 3–11.
- Petrovsky V.V., Sakharova E.I. Reformations of the Krasnoborsky riffle (the Severnaya Dvina river) // *River channel studies to improve navigation conditions*. Moscow, River transport. 1958. P. 19–23.
- Popov I.V. River channels changes and hydraulic engineering. Leningrad, Gidrometeoizdat. 1965. 328 p.
- Potapov M.V. Screw flow of liquid in a straight open channel of rectangular cross-section // *Transverse circulation in open flow and its hydraulic engineering application*. Moscow, Selkhozizdat. 1936. P. 102–154.
- Reznikov P.N. Sediment runoff and its manifestations in river channel morphodynamics. PhD work abstract. Moscow, the MSU Publishers. 2007. 23 p.
- Rossinsky K.I., Debolsky V.K. River sediments. Moscow, Nauka. 1980. 216 p.
- Rossinsky K.I., Kuzmin I.A. Some issues of the applied theory of river channel formation // *Problems of river flow regulation*. Moscow – Leningrad, *Izvestiya of the USSR Academy of Sciences*. 1947. P. 88–129.
- Rysin I.I., Petukhova L.I. Channel processes on the rivers of Udmurtia. Izhevsk, Nauchnaya kniga. 2006. 176 p.
- Seredovskikh B.A. Hydromorphology of the Konda River. Retrospective analysis of channel changes dynamics. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk State University. 2022. 155 p.
- Shantzer E.V. Alluvium of lowland rivers of the temperate zone and its role for understanding the patterns of alluvial suites structure and formation // *Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences. Issue 55*. 1951. 275 p.
- Shei Yuchang, Gong Guoyuan. Fluvial Geomorphology. Beijing, Science. 1986 (In Chinese).
- Sidorchuk A.Yu. Processes of longitudinal river profile formation // *Geomorfologiya i paleogeografiya*. 2025. Vol. 56. No. 2. P. 185–196.
- Sidorchuk A.Yu. The structure of the river channel relief. St. Petersburg, Gidrometeoizdat. 1992. 128 p.
- Sidorchuk A.Yu., Borisova O.K., Panin A.V. Late Valdai paleochannels of the Russian Plain rivers // *Izvestiya RAS. Series geographical*. 2000. No. 6. P. 73–78.
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Chernov A.V., Borisova O.K., Kovalyukh N.N. Water flow and morphology of river channels of the Russian Plain in the late Valdai time and in the Holocene (based on paleochannel analysis) // *Ehroziya pochv i ruslovye processy*. Issue 12. Moscow, the MSU Publishers. 2000. P. 196–231.
- Velikanov M.A. The channel process. Moscow, Gosfizmatizdat. 1958. 395 p.
- Velikanov M.A. The formulation of the problem of channel processes // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1946. No. 1. P. 36–46.
- Zavadskiy A.S. Hydrological and morphological analysis of free meandering channels of lowland river. PhD work abstract. Moscow, the MSU Publishers. 2001. 27 p.

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
№ 1. 2026

Формат обрезной 204x285
Объем 106 с.
Бумага офсетная
Печать цифровая
Тираж 25 экз.