



ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

SOIL EROSION AND RIVER CHANNEL PROCESSES

№ 2

апрель — июнь 2026

No. 2

April — June 2026

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. М. — 2026. — № 2. — 98 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. Шлеттерер**, 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: Японский канал в кальдере вулкана Головнина, о. Кунашир.
Илья Алдошин, магистрант кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

АДРЕС РЕДАКЦИИ

119619 Россия, Москва, улица Лазенки 6-я, д. 2, стр. 15
E-mail: epgp@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. 2. – 98 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 – Japanese channel in the caldera of the Golovnin volcano, Kunashir Island. Ilya Aldoshin, Master's Student at the Department of Physical Geography and Landscape Studies, 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

Шесть статей 2-го номера нашего журнала за 2026 год охватывают весь спектр эрозионно-русловых процессов и представляют исследования в области эрозии почв, транспорта наносов (как взвешенных, так и влекомых), русловых и устьевых процессов.

Первые четыре статьи отражают тенденцию на развитие методов и технологий, определяющих развитие науки сегодня. Практико-ориентированная статья по сельскохозяйственным регионам России и Беларуси, авторами которой выступили коллеги из обоих упомянутых в статье регионов, представляет собой реализацию автоматизированных методов оценки водной эрозии. Статья Е. Гирло и С. Харченко по одному из частных сюжетов отработки методов трассировки наносов, известному как «фингерпринтинг», несмотря на узкую методическую тематику, очень важна для исследований в этой области и по сути дает возможность авторам завершить целый блок исследований загрязнения взвесями малых рек Москвы. Наконец, статьи В.И. Замышляева — это принципиально новые построения в области изучения геометрии донных гряд, существенный шаг вперед в их познании.

Статья сотрудников географического факультета МГУ по бассейну Пура — это один из результатов крупной работы, возглавляемой Р.С. Чаловым, по созданию современного Атласа руслового режима рек России. С другой стороны, это еще и важный вклад в исследования в ЯНАО, наиболее фундаментально отраженные в Атласе опасных экзогенных процессов ЯНАО, вышедшем в начале этого года.

Завершает номер, согласно логике эрозионно-русловой системы, статья по устьям рек — бару Яны, где сотрудники лаборатории эрозии почв и русловых процессов совместно с сотрудниками геологического факультета МГУ выполнили в последние годы уникальную работу по обоснованию трассы судового хода в условиях одного из самых сложных «мерзлотных» участков внутренних водных путей РФ.

*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

А.Н. Червань, Ж.А. Буряк, Е.С. Фруль СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО СМЫВА ПОЧВ ДЛЯ ЭРОЗИОННО ОПАСНЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ БЕЛАРУСИ И БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ	8
Е.М. Гирло, С.В. Харченко ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ТРАССИРОВКИ ИСТОЧНИКОВ НАНОСОВ	25
В.И. Замышляев ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ РУСЛОВОГО АЛЛЮВИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ГРЯД	41
В.И. Замышляев АППРОКСИМАЦИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ДОННЫХ ГРЯД ВЕТВЯМИ СИНУСОИДЫ	53
Р.С. Чалов, Е.Р. Чалова, А.А. Куракова, Г.Б. Голубцов УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И МОРФОДИНАМИКА РУСЛА ПУРА И РЕК ЕГО БАССЕЙНА: КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ГЕОГРАФИЯ	66
А.С. Завадский, А.П. Ермаков, А.М. Пятилова, П.П. Головлев МЕРЗЛОТНЫЕ УСЛОВИЯ СУДОХОДНОГО БАРОВОГО УЧАСТКА РЕКИ ЯНЫ	79



CONTENTS

A.N. Chervan, J.A. Buryak, E.S. Frul IMPROVING TECHNOLOGIES FOR AUTOMATED ASSESSMENT OF POTENTIAL SOIL WASHOUT FOR EROSIVELY HAZARDOUS AGRICULTURAL LANDSCAPES IN BELARUS AND THE BELGOROD REGION	8
E.M. Girlo, S.V. Kharchenko PARTICLE SIZE CORRECTION OF CHEMICAL ELEMENT CONCENTRATIONS IN SEDIMENT SOURCE FINGERPRINTING	25
V.I. Zamyshlyaev INFLUENCE OF THE CHANNEL ALLUVIUM PROPERTIES ON THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF BOTTOM DUNES	41
V.I. Zamyshlyaev APPROXIMATION OF THE LONGITUDINAL PROFILE OF RIVER DUNES USING SINE WAVE BRANCHES	53
R.S. Chalov, E.R. Chalova, A.A. Kurakova, G.B. Golubtsov CONDITIONS FOR THE FORMATION AND MORPHODYNAMICS OF THE PUR RIVER AND ITS BASIN: MAPPING AND GEOGRAPHY	66
A.S. Zavadsky, A.P. Yermakov, A.M. Pyatilova, P.P. Golovlev PERFROST CONDITIONS OF THE YANA RIVER'S SHIPPING BAR SECTION	79

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО СМЫВА ПОЧВ ДЛЯ ЭРОЗИОННО ОПАСНЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ БЕЛАРУСИ И БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

А.Н. Червань^{1*}, Ж.А. Буряк^{2,3}, Е.С. Фруль¹

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

³Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

*chervanalex@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2025

После доработки 13.06.2026

Принята к публикации 15.06.2026

Аннотация. Вследствие сельскохозяйственной трансформации ландшафтов рост темпов водной эрозии почв отмечается как на глобальном, так и на национальных уровнях. В странах СНГ водная эрозия является наиболее распространенным видом деградации сельскохозяйственных земель. Совершенствование подходов к решению проблемы управления эрозионно опасными агроландшафтами предполагает разработку автоматизированных методов оценки водной эрозии заданной пространственной точности с учетом всех факторов землепользования.

В статье приводятся результаты моделирования темпов водной эрозии на региональном уровне — в Брестской области Республики Беларусь и Белгородской области РФ. Приведен сравнительный анализ факторов эродированности, в том числе на примере результатов моделирования водной эрозии на ключевых участках. При оценке топографических условий учтены глобальные и локальные цифровые модели рельефа, полученные на основе радиолокационных данных, данных лазерного сканирования местности (лидарная съемка), и соответствующее программное обеспечение. На основе расчетов по модели оценены потенциальные потери почвы вследствие ливневой водной эрозии, в том числе для разных генетических типов почв — дерново-подзолистых и черноземов типичных. Полученные результаты позволяют определить очередность принятия различных, в том числе дорогостоящих, мер по борьбе и предотвращению водной эрозии, необходимых для получения устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур с сохранением обоснованной себестоимости их производства.

Ключевые слова: водная эрозия почв, модели потенциального смыва, агроландшафт, ДДЗ, лидарная съемка

DOI: 10.71367/3034-4638-2026-2-2-8-24

ВВЕДЕНИЕ

С середины XX в. активное вмешательство человека в геоморфологические процессы привело к глобальным изменениям, связанным с ускорением процессов денудации (Cendrero et al., 2022). Сельскохозяйственная трансформация ландшафтов оказывает значительное влияние на рост темпов водной эрозии почв (Garcia-Ruiz et al., 2015). Сегодня ускоренная антропогенная эрозия почвы является глобальной проблемой современности со значимыми экономическими и экологическими последствиями. Потери питательных элементов и ор-

ганического вещества, ухудшение агрофизических и агрохимических свойств — причина снижения плодородия эродированных и эрозионно опасных почв сельскохозяйственных земель. Оценка глобальной скорости водной эрозии с 2001 по 2012 г. (Bogrelli et al., 2017) показала увеличение среднегодовых темпов эрозии почвы на 2.5%, общий объем потерь почвенного материала оценивается в 35.9 млрд т/год. Эрозионные агроландшафты характеризуются не только снижением продуктивной способности почв сельскохозяйственных земель, но и понижением экологической устойчивости

почвенного покрова. Системы управления землепользованием, сфокусированные на экологическую реабилитацию, являются на сегодняшний день ключевым механизмом регулирования и снижения темпов эрозии (Xiong et al., 2019).

Глобальная проблема водной эрозии почв актуальна и для стран СНГ, в частности для России и Беларуси. Для России это наиболее распространенный вид деградации сельскохозяйственных земель. Согласно Государственному докладу РФ «О состоянии и об охране окружающей среды», все без исключения регионы страны в европейской части России, где сосредоточено основное растениеводческое производство страны, 34% пашни и 51% кормовых угодий подвержены водной эрозии (Государственный доклад... 2022). Особенно от водной эрозии страдают черноземы. Это крупнейший почвенный депозитарий органического углерода (250–320 т/га в слое 0–100 см), более половины мировой площади черноземов расположено в России (Lisetskii, 2023). Для оценки деградации земель на национальном и субнациональном уровнях в качестве дополнительного индикатора нейтральности деградации земель (Mitasova et al., 1996) были предложены показатели динамики эрозии почв (Tsymbarovich et al., 2020) (помимо динамики землепользования, продуктивности земель и содержания органического углерода почвы). Для европейской территории России изменения в динамике земельной эрозии за три последние десятилетия обусловлены климатическими и социально-экономическими факторами. Общая интенсивность эрозионных потерь почв в европейской части России снизилась. Из социально-экономических факторов главные — ускорение сокращения площади пашни и изменение структуры посевных площадей. Значительное сокращение площади обрабатываемых земель (Иванов и др., 2017) с сопутствующими климатическими изменениями во всех ландшафтных зонах после 1991 г. является основной причиной сокращения общих годовых потерь почвы на 46% в 2012 г. по сравнению с 1980 г. (Golosov et al., 2018). Эту тенденцию также подтверждает значительное сокращение стока взвешенных наносов в реках (Gusarov, 2021).

Из всех видов деградации земель в Беларуси эрозия почв является наиболее выраженной и значимой. Масштабы ее распространения на обрабатываемых землях Беларуси, размеры экономического и экологического ущерба, причиняемого сельскохозяйственному производству и окружающей среде, свидетельствуют о том, что эта проблема требует постоянного совершенствования подходов к ее решению. В Беларуси водной эрозии

подвержено 473.3 тыс. га (Атлас почв... 2017), которые преимущественно приурочены к пахотным землям в северной и центральной частях страны на более гранулометрически тяжелых почвообразующих породах. Из общей площади почв, подверженных водной эрозии, 268.3 тыс. га (57%) составляют слабосмытые почвы, 120.0 тыс. га (25%) — среднесмытые почвы, 20.2 тыс. га (4%) — сильносмытые почвы и 64.7 тыс. га (14%) — намытые почвы (Цыбулько, 2022). Исследования показывают, что на пахотных землях ежегодно с одного гектара водосборной площади с поверхностным стоком смывается или выносится ветром в среднем до 10–15 т почвенного материала, 150–180 кг гумусовых веществ, безвозвратно теряется до 10 кг азота, 4–5 кг фосфора и калия, 5–6 кг кальция и магния. Установлено, что отрицательное влияние контурности пахотных земель сказывается на размере рабочего участка менее 15 га (Черныш и др., 2015).

Таким образом, почвенный покров эродированных сельскохозяйственных земель требует применения адаптивно-ландшафтных систем земледелия, базирующихся на использовании земель определенной экологической группы, ориентированных на производство продукции экономически обусловленного количества и качества, обеспечивающей устойчивость агроландшафта и воспроизводство почвенного плодородия. В адаптивно-ландшафтных системах земледелия, направленных на ограничение вероятности проявления водно-эрозионных процессов, алгоритм планирования заключается в том, что по каждой отдельной агротехнологической группе земель определяется оптимальный тип севооборота умножением значения потенциального смыва почвы на нормативы противоэрозионной способности различных севооборотов, способов обработки почвы и последующего сравнения полученного значения смыва с предельно допустимым смывом почвы (2 т/га). Объективная оценка степени эрозионной опасности почв позволяет ранжировать типы земель на агротехнологические и агропроизводственные группы по возможной интенсивности сельскохозяйственного использования, в том числе на водосборах озер и рек. Подходы к решению данной проблемы рассмотрены в данной статье.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПОВ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Рациональное управление почвенными и земельными ресурсами не может обойтись без учета масштабов нарушенности почвенного покрова под воздействием водной эрозии, особенно на распаханых землях. Наиболее часто используемым



Рис. 1. Визуализация рельефа Брестской (Республика Беларусь) и Белгородской (РФ) областей и расположение ключевых участков (2) в их границах (1)

Fig. 1. Visualization of the relief of the Brest (Republic of Belarus) and Belgorod (Russian Federation) regions and the location of key sites (2) within their borders (1)

способом пространственного отражения процессов водной эрозии и их прогнозирования является эрозионное моделирование (Batista et al., 2019; Borrelli et al., 2021; Jetten et al., 2003; Karydas et al., 2014; Senanayake et al., 2022). Самые популярные в исследованиях математические модели RUSLE, USLE, WEPP, SWAT и WaTEM/SEDEM (Bezack et al., 2021). Они оценивают риск эрозии через среднегодовые потенциальные почвенные потери с единицы площади. В обобщенном виде модель расчета среднегодовых почвенных потерь (Wischmeier, Smith, 1978) имеет вид:

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

где W — среднегодовые почвенные потери от ливневых осадков (т/га в год); R — эрозионный потенциал ливневых осадков максимальной 30-минутной интенсивности (МДж·мм/м²·час·год); K — фактор эродированности почв (т/га на единицу эрозионного потенциала осадков); LS — фактор рельефа (усл. ед.); C — эрозионный индекс культуры или севооборота (безразмерная ед.); P — коэффициент почвозащитной эффективности противоэрозионной меры (безразмерная ед.).

С использованием данной эмпирической модели и ее различных модификаций для различных регионов, в том числе в глобальных масштабах, выполнены оценки темпов водной эрозии (GloSEM (Borrelli et al., 2022); ELM-Erosion (Tan et al., 2022); PESERA Model (Kirkby et al., 2008)), а также отдельных ее факторов (Sun et al., 2024). Результаты моделирования доступны как в виде интерактивных веб-ресурсов, так и в виде пакетов данных для скачивания с геопорталов, например European Soil

Data Centre (ESDAC) (Panagos et al., 2012). Сведения о темпах эрозионной деградации могут быть обобщены в границах различных территориальных единиц, например, речных бассейнов (Yermolaev et al., 2023). Также разрабатываются долгосрочные прогнозы изменения темпов водной эрозии в зависимости от изменения интенсивности осадков по различным глобальным климатическим сценариям (Panagos et al., 2022).

Общедоступные глобальные модели водной эрозии позволяют выполнить сравнительный анализ темпов почвенных потерь для различных территорий, отличающихся по климатическим, почвенным и геоморфологическим условиям с различной спецификой земледелия. Для сравнения были выбраны Брестская область Республики Беларусь и Белгородская область, находящаяся в европейской части РФ (рис. 1, табл. 1).

Деградация почвенного покрова происходит в результате преимущественно двух видов водной эрозии: ливневой эрозии и эрозии от стока талых вод (весеннего смыва). Для территории Брестской области, как и в целом по Беларуси, на талый сток приходится 44% почвенных потерь, на ливневый — 56% (Черныш и др., 2015). Для юга Центрально-Черноземного района России, к которому относится Белгородская область, роль эрозии почв при ливнях и снеготаянии также примерно одинакова (Каштанов и др., 1999). Однако для обеих областей изменения условий увлажнения и теплообеспеченности с середины 80-х гг. XX в. привели к одновременному уменьшению запасов воды в снеге, снижению глубины промерзания почвы и талого стока (Барабанов, Панов, 2012). В резуль-

Таблица 1. Сравнительная характеристика эрозионной опасности Брестской (Республика Беларусь) и Белгородской (РФ) областей

Table 1. Comparative characteristics of erosion hazard in Brest (Republic of Belarus) and Belgorod (Russian Federation) regions

Характеристика	Брестская область	Белгородская область
Площадь, тыс. км ²	32.8	27.1
Площадь пашни, тыс. км ²	8.4	15.0
Распаханность, %	26	55
Лесистость, %	38.6	12.2
Густота ОБДС*, км/км ²	0.2–0.4	1.1
Вертикальное расчленение, м/км ²	13	63
Средняя крутизна на пашне, °	0.4	2.5
Доля эродированной пашни, %	4.7 16.3**	54
Эрозионный потенциал дождевых осадков R (МДж·мм/м ² ·час·год) (Ларионов, 1993)	8.0	8.0
Эрозионный потенциал рельефа LS	0.50	1.49
Эродируемость почв, K (т/га на МДж·мм/м ² / час в год)	0.020	0.031
Среднегодовые темпы ливневой эрозии W , т/га·год (Borrelli et al., 2022)	0.54	1.19

* ОБДС — овражно-балочная дренажная сеть.

** В Барановичском районе, где расположен ключевой участок.

тате в настоящее время отмечается установление абсолютного преобладания ливневой эрозии над эрозией от снеготаяния (Maltsev, Yermolaev, 2020; Petelko et al., 2007). Поэтому далее мы будем касаться только проблемы ливневой эрозии.

Распространение эродированных почв на пахотных землях в Республике Беларусь крайне неоднородно и связано, в первую очередь, с гранулометрическим составом почв (рис. 2) и распаханностью территории, тогда как фактор рельефа менее значим (Цыбулько, 2022). Более всего эродированы почвы северной части страны на возвышенностях ледникового генезиса, площадь территорий с долей смытых почв более 20%. Для условий Центральной Беларуси, куда относится наиболее эродированный север Брестской области, среднегодовые темпы водной эрозии оцениваются в 0.43 т/га в год (для земель всех категорий), причем лишь на 2.3% территории эта величина превышает 10 т/га. В границах Брестской области пашня занимает 26% всех земель, большинство сельскохозяйствен-

ных организаций возделывают пропашные культуры. Южная часть области представляет обширную низменную заболоченную равнину, протянувшуюся вдоль долины р. Припяти. Центральная часть занята водно-ледниковой равниной. Колебания относительных высот здесь — 2–3 м. В результате расчленения ложбинами территория междуречий приобрела пологоувалистый характер. Равнинность территории на севере области нарушается краевыми ледниковыми образованиями, для которых характерен среднехолмистый, холмистоувалистый, мелкохолмистый и пологоувалистый рельеф. Процессы поверхностного смыва почвы на данных территориях получили максимальное распространение.

В составе сельскохозяйственных земель Брестской области 26.1% занимают дерновые и дерново-карбонатные заболоченные почвы, 25.4% — дерново-подзолистые заболоченные, 20.3% — дерново-подзолистые, 18.8% — торфяно-болотные почвы. Удельный вес переувлажненных почв (полу-

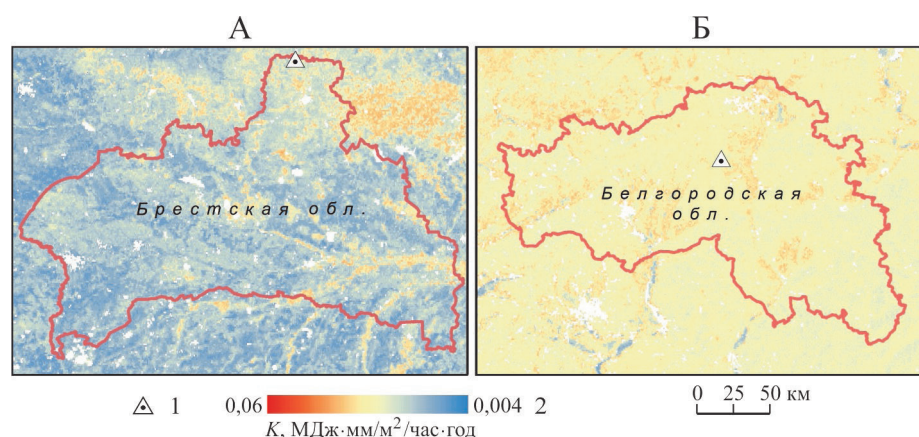


Рис. 2. Фактор эродруемости почв K , $\text{МДж} \cdot \text{мм} / \text{м}^2 / \text{час} \cdot \text{год}$ (2): А — Брестская обл.; Б — Белгородская обл. (данные с ресурса <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erodibility>). 1 — ключевые участки

Fig. 2. Soil erosion factor K , $\text{MJ} \cdot \text{mm} / \text{m}^2 / \text{hour} \cdot \text{year}$ (2): А — Brest region; Б — Belgorod region (data from the resource <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erodibility>). 1 — key areas

гидроморфных и гидроморфных) составляет максимальное для Беларуси значение — 79,6%. При этом в ключевом Барановичском районе более половины площади сельскохозяйственных земель (62,2%) занимают автоморфные почвы. Гранулометрический состав 36,5% почв представлен песчаными мощными, 22,8% — торфяными, 22,2% — супесчаными. Продуктивная способность почв области характеризуется баллом кадастровой оценки 30,2 для всех сельскохозяйственных земель, из которых пахотные — 31,6, улучшенные луговые — 30,9. В среднем 10 из 16 административных районов Брестской области оцениваются средним баллом продуктивной способности более 30,0.

В целом по области доля эродированных почв пашни незначительна и составляет 4,7%, достигая максимальных значений 16,3% в Барановичском районе на севере. Несмотря на незначительные площади земель, подверженных эрозионным процессам, водная эрозия наносит существенный экономический и экологический ущерб. При среднегодовых темпах смыва в 10 т/час поверхностным стоком ежегодно теряется в среднем 150–180 кг гумуса, до 10 кг азота, 4–5 кг фосфора и калия, 5–6 кг кальция и магния (Юхновец, Устинова, 2019).

В Белгородской области, наоборот, геоморфологические условия являются ведущим фактором интенсивности поверхностного смыва почв (рис. 3). Территория охватывает переходную зону от южной лесостепи к северной степи на юго-западе Среднерусской возвышенности и представляет собой слабоволнистую возвышенную эрозионно-денудационную равнину, разработанную речными долинами с разветвленными балочными комплексами.

Выращивание сельскохозяйственных культур, с преобладанием зерновых, осуществляется в условиях склонового рельефа, а средняя крутизна склона на пашне в 6,3 раза выше, чем в Брестской области. Эродированные почвы распространены здесь повсеместно. При распаханности региона в 55% более половины обрабатываемых земель в той или иной степени нарушены водно-эрозионными процессами (Лукин и др., 2008). В почвенном покрове Белгородской области преобладают черноземы на лессовидных суглинках и глинах (77%), в основном типичные и выщелоченные. Серые лесные почвы занимают около 15%. По сравнению с несмытыми почвами содержание гумуса в пахотном слое снижается на слабосмытых почвах в 1,1–1,3 раза, среднесмытых — 1,4–1,7 и сильносмытых — 1,8–2 раза. Сокращение запасов гумуса для черноземов составляет на слабосмытых почвах 50–83 т/га, среднесмытых — 170–216, сильносмытых 242–293 т/га, а бонитет составляет соответственно 56–64, 35–42 и 33 балла, при оценке несмытых черноземов плакоров в 68–79 баллов (Тютюнов и др., 2004).

Среднегодовой смыв с пашни от ливневых осадков составляет 3,5 т/га, при этом доля пашни с эрозионными потерями более 10 т/га в год составляет 6% (Buryak et al., 2022). Смытые почвы Белгородской области потеряли около 130 млн т гумуса, из-за чего наблюдается снижение их продуктивности — ежегодный недобор продукции в пересчете на зерно составляет 1,22 млн т (Соловиченко, Тютюнов, 2013).

По среднеегодовому значению эрозионного индекса ливневых осадков Брестская и Белгородская области находятся в одинаковых условиях,

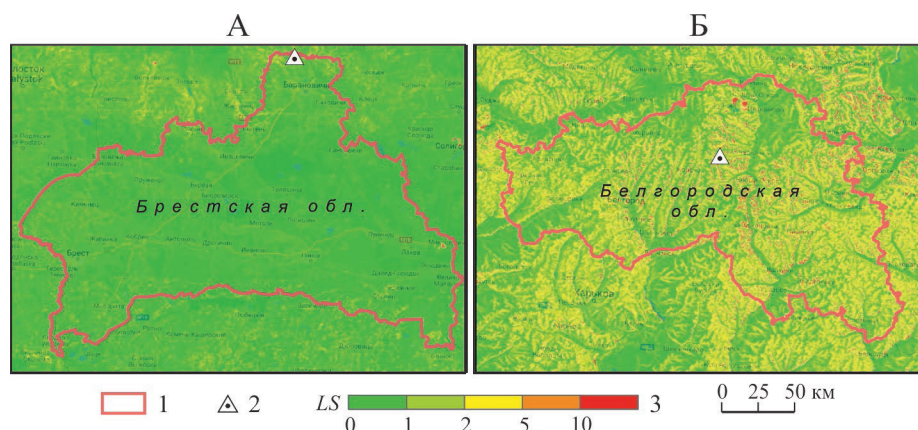


Рис. 3. Распределение значений эрозионного потенциала рельефа LS (3). А – Брестская область; Б – Белгородская область. 1 – границы областей; 2 – ключевые участки (данные с ресурса <https://ee-landeco.projects.earthengine.app/view/nogis>) (Гафуров, 2024)

Fig. 3. Distribution of the values of the erosion potential of the relief LS

значение индекса составляет примерно 8 единиц. Наиболее эрозионно опасными месяцами являются июль и август. Одно из наиболее высоких значений эрозионного индекса приходится на июль, но оно совпадает с максимальным проективным покрытием почвы растениями, что в значительной степени снижает эрозионную опасность дождей в этот период.

Среднегодовые темпы ливневой эрозии с сельскохозяйственных земель по глобальной модели GloSEM 1.3 (рис. 4) с разрешением 100 м показывают превышение почвенных потерь в Белгородской области по сравнению с Брестской в 2.2 раза. Это согласуется с оценками отдельных факторов почвенной эрозии, где для Белгородской области характерны более высокие значения эрозионного потенциала рельефа и эродированности почв. В целом

открытые источники данных с оценками темпов эрозионной деградации почв и отдельных показателей могут дать удовлетворительные результаты для использования на региональном и субрегиональном уровнях. Однако при исследовании эрозионных процессов целесообразно использовать более детальную информацию, прежде всего о рельефе и почвенном покрове оцениваемой территории.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ ПОЧВ НА КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКАХ

Для сравнения пространственной картины темпов водной эрозии в каждом регионе исследования были выбраны ключевые участки пашни: белорусский участок в Барановичском районе Брестской области площадью 93.9 га и российский участок в

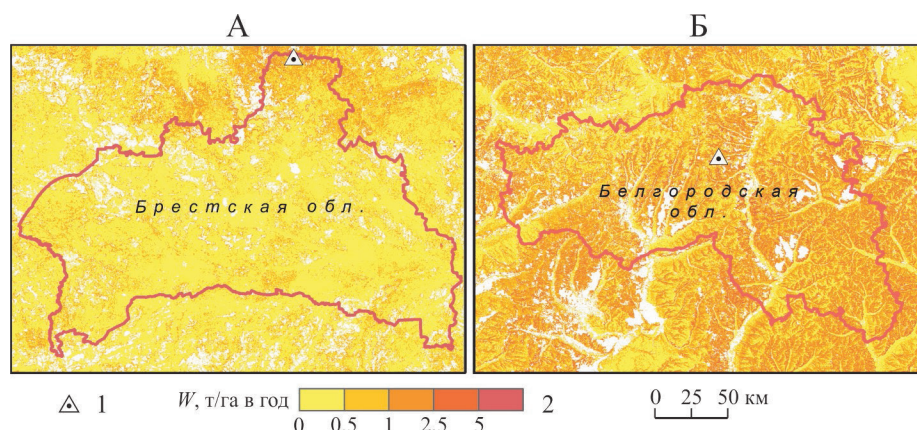


Рис. 4. Среднегодовые темпы ливневой эрозии по глобальной модели на сельскохозяйственных землях GloSEM 1.3. А – Брестская обл.; Б – Белгородская обл.; 1 – ключевые участки; 2 – W , т/га·год (данные с ресурса <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/glosem> (Borrelli et al., 2022))

Fig. 4. Average annual rates of storm erosion according to the global model on agricultural lands GloSEM 1.3

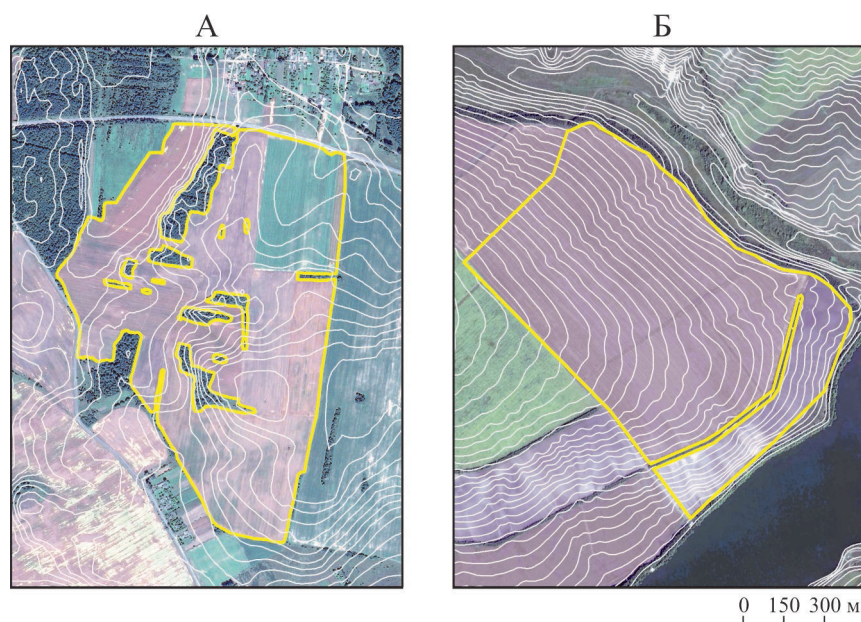


Рис. 5. Ключевые участки моделирования темпов ливневой эрозии (сечение горизонталей 2 м).

А — Беларусь, Брестская обл., Барановичский район; Б — Россия, Белгородская обл., Чернянский район

Fig. 5. Key areas for modeling the rates of storm erosion (horizontal section of 2 m)

Чернянском районе Белгородской области площадью 94.1 га (рис. 5).

На участке в Брестской области представлены ключевые особенности рельефа Новогрудской возвышенности, которая входит в состав Западно-Белорусской подобласти Центрально-Белорусских возвышенностей и гряд. Новогрудская возвышенность представляет собой водораздел между бассейнами р. Неман и малых рек центра страны и характеризуется монолитностью очертаний и четкой ограниченностью глубокими речными долинами. Участок является действующим сельскохозяйственным землепользованием местного крестьянско-фермерского хозяйства.

Участок в Белгородской области также является типичным примером склонового рельефа агроландшафтов, характерного для юго-запада Среднерусской возвышенности с густой, глубоко врезанной овражно-балочной сетью.

Моделирование темпов ливневой эрозии с чистой почвы (пара) выполнялось по модели семейства USLE (Wischmeier, Smith, 1978). Расчет факторов эрозионного потенциала осадков и эродируемости почв был взят в адаптации для условий Европейской России (Ларионов, 1993). Эрозионный индекс культур или севооборота S был принят за 1 для пара. Коэффициент почвозащитной эффективности противозерозионной меры P также был принят за 1.

Эрозионный потенциал осадков R представляет собой произведение кинетической энергии

дождевых капель, выпавших за дождь на площади в один гектар, на 30-минутную максимальную интенсивность дождя. Эти данные были впервые обобщены для территории СССР к середине 80-х гг. XX в. (Ларионов, 1993). Согласно схематической карте эрозионного потенциала дождевых осадков, оба ключевых участка имеют значения R -фактора, близкие к 8.

Фактор эродируемости почв K зависит от гранулометрического состава почвы, содержания гумуса, структуры, водопроницаемости и каменистости почвы. В оригинальной методике расчета использован принятый в международной практике порог разделения фракций ила (silt) и глины (clay) в 0.002 мм. Это затрудняет расчеты, поскольку отечественный стандарт разделения элементарных почвенных частиц, по Н.А. Качинскому, использует другие градации. Поэтому расчет K -фактора был адаптирован для удобства использования принятой классификации (Ларионов, 1993):

$$K = \{16.67 \times 10^{-6} \times [m_s \times (100 - m_c)]^{1.14} \times (12 - a) + 0.25 \times (b - 2) + 0.193(4 - c)\} \times z, \quad (2)$$

где: m_s — содержание фракций 0.1–0.001 мм, %; m_c — содержание фракций <0.001 мм, %; a — содержание гумуса, %; b — класс структуры почвы; c — класс водопроницаемости почвы; z — коэффициент каменистости и щебнистости.

Информация о почвенном покрове получена из материалов крупномасштабного почвенного обследования (карты масштаба 1:10 000). На белорус-

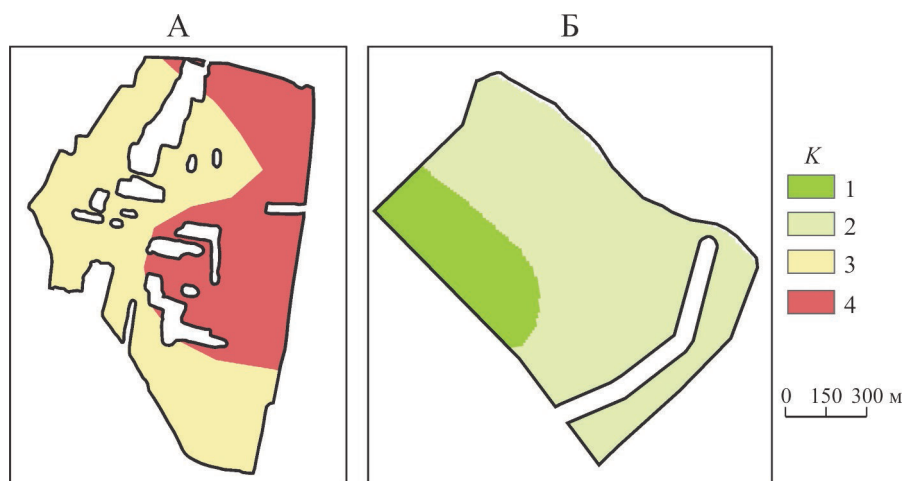


Рис. 6. Распределение фактора эролируемости почв K (1 – 0.99; 2 – 1.39; 3 – 2.57; 4 – 4.87) на ключевых участках Брестской обл. (А) и Белгородской обл. (Б)

Fig. 6. Distribution of the soil erosion factor K

ском участке представлены два генетических типа почв: в восточной части — дерново-подзолистая сильно- и среднеподзоленная, местами слабоэродированная на легких водно-ледниковых суглинках почва; в западной части доминирует дерново-подзолистая слабоподзоленная, местами слабоэродированная на рыхлых водно-ледниковых супесях. На белгородском участке представлены черноземы типичные тяжелосуглинистые, малогумусные на лессовидных суглинках, на большей части с проявляющимися признаками окарбонативания; степень эродированности сменяется от несмытых почв на плакоре до среднесмытых в нижней части склонов.

Сравнение почвенных свойств и значений K -фактора для участков приведено на рис. 6 и в таблице 2. Параметры для расчета брались из обобщенных данных в региональных почвенных справочниках (Атлас почв... 2017; Соловиченко, Тютюнов, 2013).

На ключевом белорусском участке супесчаные почвы на западе более устойчивы к водной эрозии, в отличие от легких суглинков, по показателям гранулометрического состава и водопроницаемости. Это обусловило контрастность участка по K -фактору: восточная часть, несмотря на большее содержание гумуса, почти в 2 раза сильнее эродируема. Черноземы на участке Белгородской

Таблица 2. Сравнение расчетных параметров эролируемости почв ключевых участков

Table 2. Comparison of calculated parameters of soil erosion in key areas

Область	Беларусь, Брестская область		Россия, Белгородская область	
Почва	дерново-подзолистая на рыхлых ледниковых супесях	дерново-подзолистая на легких водно-ледниковых суглинках	чернозем типичный на лессовидных суглинках	чернозем типичный карбонатный на лессовидных суглинках
Доля фракций 0.1–0.001 мм (m_s), %	43.0	81.4	62.1	67.9
Доля фракций <0.001 мм (m_c), %	3.1	7.5	35.1	31.6
Содержание гумуса (a), %	1.6	1.9	6.2	5.5
Класс структуры (b)	3	3	1	1
Класс водопроницаемости (c)	4	3	4	4
Коэффициент каменистости и щебнистости (z)	1	1	1	1
K -фактор	2.57	4.87	0.99	1.39

области менее контрастны по этому показателю и в среднем в 2–4 раза более устойчивы к размыву по сравнению с дерново-подзолистыми почвами за счет высокого содержания органического вещества и большей доли мелких фракций.

Из всех представленных факторов эрозии самым разнообразным по источникам открытых данных является рельеф. Поэтому при расчете использовали различные источники данных LS -фактора:

– глобальная ЦМР FABDEM V1.2 (Forest And Buildings removed Copernicus DEM), созданная на основе Copernicus GLO-30 DEM. В данной модели с использованием алгоритма Randomforest удалены артефакты высот лесных массивов и застройки, что делает ее более корректной при геоморфологическом анализе и гидрологическом моделировании (Hawker et al., 2022). Исходное разрешение ЦМР составляет 1 угловую минуту, что при проецировании соответствует разрешению 30×30 м;

– ЦМР, созданная на основе радиолокационных снимков с аппарата Sentinel-1 разрешением 10×10 м. По паре снимков методом дифференциальной спутниковой интерферометрии определяется разность фаз эхо-сигналов, зарегистрированных от одного и того же участка местности. После развертки фазы получают модель высот. Обработка снимков проводилась в программном продукте SentinelApplicationPlatform (SNAP);

– данные лидарной съемки, выполненные на ключевом участке в Брестской области. Применяемый в исследовании лазерный сканер DJI Zenmuse L1 позволяет получать до трех отражений лазерного луча, имеет диапазон обнаружения 450 м при коэффициенте отражения 80% и 190 м при коэффициенте отражения 10%, обеспечивает плотность облака точек на уровне 100 точек/м² при высоте полета 100 м; точность получения координат по горизонтали составляет 10 см, по вертикали 5 см при высоте полета 50 м. Постобработку «сырых» данных выполняли в ПО DJITerra. Полученные облака точек загружали в специализированное ПО QuickTerrainModeler для классификации по следующим категориям: земля (ground), неклассифицированные точки (default), низкая растительность (lowvegetation), средняя растительность (mediumvegetation), высокая растительность (highvegetation), строения (building) и т. д. На основе классифицированных облаков точек можно построить ЦМР с разрешением до 0.3 м/пиксель. Для моделирования разрешение ЦМР привели к 1 м/пиксель.

При сопоставлении результатов моделирования за эталон была принята ЦМР, полученная по технологии LiDAR, как наиболее точная и достоверная.

Для корректного сравнения все модели были приведены к единому пространственному разрешению 30 м. Сравнение ЦМР по значениям абсолютных высот не производилось, поскольку источники данных FABDEM и Sentinel-1 базируются на разных датумах. Поэтому сравнение точности выполнялось не по разности абсолютных высот, а по рассчитанным значениям LS -фактора (рис. 7). На белгородском участке лидарная съемка не проводилась, корректность ЦМР оценивалась в сравнении с рисунком горизонталей топографических карт.

Расчет LS -фактора выполнялся по усовершенствованной формуле, где параметр длины заменен на площадь поверхности стока A_s (Mitasova et al., 1996; Moore, Wilson, 1992) с вышележащих по склону ячеек:

$$LS = (m + 1) [A_s/a_0]^m [\sin B/b_0]^n, \quad (3)$$

где: A_s – площадь поверхностного стока, отнесенная к ширине потока (размеру ячейки), м²/м; B – крутизна склона, град.; a_0 и b_0 – соответственно длина и синус угла наклона стандартной стоковой площадки (22.1 м и 0.0896); m , n – эмпирические коэффициенты, зависящие от соотношения ручейковой и междучейковой эрозии на склоне (силы потоков). Рекомендуемые значения: $m = 0.4$ (при размахе 0.2–0.6); $n = 1.3$ (при размахе 1.0–1.3). Для получения растровых моделей параметров рельефа для расчета по формуле (3) использовался модуль SpatialAnalyst программы ArcGISPro, в частности пакеты инструментов, наборы Surface, Hydrology, MapAlgebra. Порядок анализа ЦМР:

- 1) проецирование в UTM;
- 2) заполнение локальных понижений (Hydrology>Fill);
- 3) построение растра направления стока (Hydrology>FlowDirection);
- 4) построение растра аккумуляции стока (Hydrology>FlowAccumulation);
- 5) построение растра водосборной площади к ширине потока « A_s » (MapAlgebra>RasterCalculator: растр аккумуляции стока $\times$ площадь ячейки/разрешение);
- 6) построение растра крутизны склона «Slope» (Surface>Slope).

Итоговая запись для построения растра LS -фактора в ArcGIS имеет вид:

$$“LS” = 1.4 * \text{Power}((“A_s” / 22.13), 0.4) * \text{Power}((\sin(“Slope” * 0.0174533) / 0.0896), 1.3) \quad (4)$$

Основным недостатком использования радиолокационной съемки является то, что древесно-кустарниковая растительность искажает значения

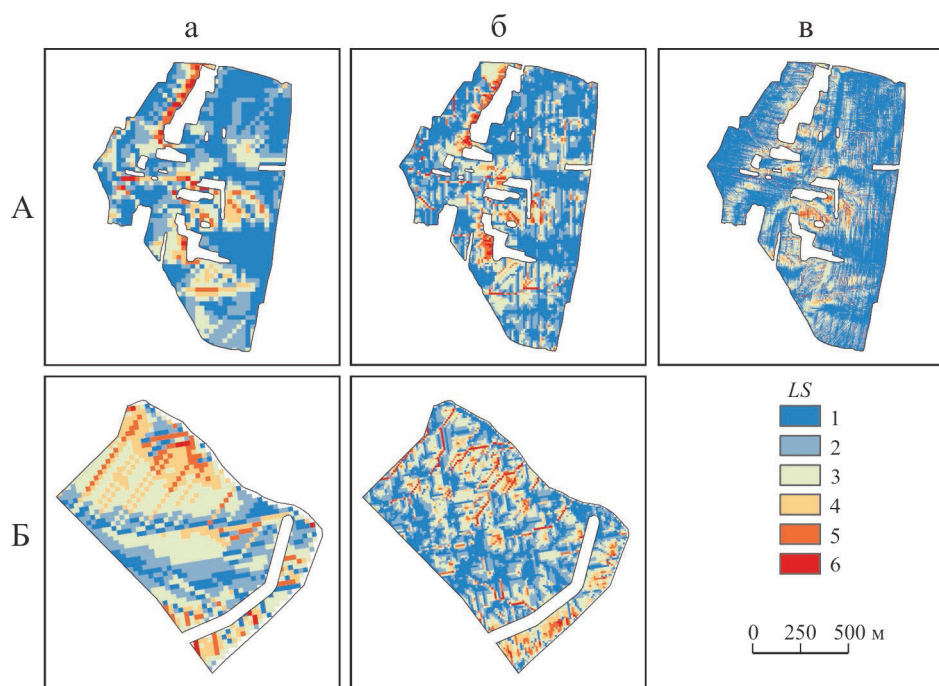


Рис. 7. Результаты моделирования *LS*-фактора по ЦМР с разной разрешающей способностью на брестском (Беларусь) (А) и белгородском (Россия) (Б) участках:
 а – FABDEM V1.2 30×30 м; б – Sentinel-1 10×10 м;
 в – LiDAR 1×1 м. *LS*-factor: 1 – 0–0.5; 2 – 0.6–1; 3 – 1.1–2; 4 – 2.1–3; 5 – 3.1–5; 6 – >5

Fig. 7. The results of *LS*-factor modeling by DEM with different resolution

высоты. Это связано с отражением радиоволн от крон деревьев. В свою очередь лидарная съемка позволила сформировать точную модель рельефа, очищенную от растительности. Однако для моделирования эрозионных процессов на открытой поверхности пашни разница в данных между лидарной и радиолокационной съемкой незначительна, что позволяет утверждать, что для моделирования процессов водной эрозии в региональных масштабах использование радиолокационных данных является рациональным решением.

Сравнение результатов расчета *LS*-фактора с данными лидарной съемки показывает схожее распределение ошибок как у FABDEM, так и у Sentinel-1 (рис. 8). Основная масса ошибок *LS*-фактора сконцентрирована в промежутке от –0.5 до 0.5. Средняя ошибка у обеих ЦМР составила 0.12, причем у обеих моделей наблюдаются завышенные значения на участках склона ниже массивов древесно-кустарниковой растительности. Это связано с методикой расчета крутизны, которая основана на разнице высот между соседними ячейками. На границе пашни, когда вышележащие ячейки попадают на древесную растительность и учитывают ее высоту, будут более высокие превышения, и следовательно, значения крутизны. Эта ситуация

неизбежна при работе глобальных ЦМР, даже с использованием маски полей. При этом чем меньше разрешение ЦМР, тем больше площадь с завышенными значениями. Так, среднее значение *LS* для белорусского участка по FABDEM, Sentinel-1 и LiDAR (в исходном разрешении) соответственно равно 0.92, 0.89 и 0.76. То есть FABDEM с разрешением в 25 раз меньше, чем у LiDAR, дает завышение *LS* на 21%, что скажется на итоговых значениях почвенных потерь при моделировании. Нужно учитывать, что высокая изрезанность лесными полосами «внутри» пашни может привести к завышенным расчетным значениям темпов эрозии при использовании глобальных ЦМР.

Белгородский участок показывает значительно более явные отличия между моделями на основе FABDEM и Sentinel-1 (см. рис. 7). «Пятен» от постобработки данных радарного сканирования здесь больше, локальные водоразделы не читаются, уклоны распределены неравномерно. Следовательно, для территории Белгородской области использование радарных данных нежелательно.

В целом по точности и характеру артефактов глобальная FABDEM не уступает, а в некоторых случаях показывает себя лучше, чем ЦМР, созданная на основе Sentinel-1. С учетом сложности

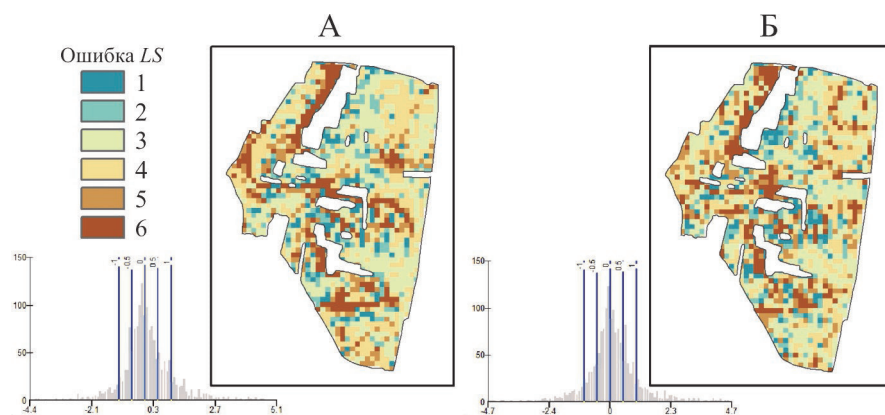


Рис. 8. Матрица ошибок LS -фактора (разрешение 30 м) и гистограммы их распределения относительно эталонной модели, построенной по результатам лидарной съемки, для ключевого участка Брестской области.

А – FABDEM V1.2; Б – Sentinel-1. Ошибка LS : 1 – <-1 ; 2 – $-0.9-(-0.5)$; 3 – $-0.4-0$; 4 – $0.1-0.5$; 5 – $0.6-1$; 6 – >1

Fig. 8. An LS -factor error matrix (resolution 30 m) and histograms of their distribution relative to the reference model based on lidar survey results for a key area of the Brest region

подбора пар снимков и трудоемкой обработки радарных данных предпочтительно использовать ЦМР FABDEM. Конечно, ее точность не сравнится с данными инструментальной лидарной съемки, но главное преимущество — это оперативность получения пространственной информации о рельефе, а также масштабы охватываемой территории. Лидарная съемка, как самая высокоточная, может использоваться для локальных исследований водной эрозии, а ее высокое разрешение позволяет детектировать первичные струйчатые размывы. Однако такая детальность может быть избыточна для моделирования темпов смыва почвы.

Сравнение расчетных среднегодовых темпов ливневой эрозии для ключевых участков представлено на рис. 9.

Моделирование потенциального смыва почвы показало, что темпы ливневой эрозии с чистого пара на участке в Брестской области в 2 раза выше, чем в Белгородской. Это связано, прежде всего, с разной противоэрозионной устойчивостью зональных почв: дерново-подзолистые почвы превышают по K -фактору черноземы типичные в 2.7 раза. При этом условия рельефа на Белгородском участке более эрозионно опасные — LS -фактор здесь больше в 1.4–1.6 раза (в зависимости от исходной ЦМР).

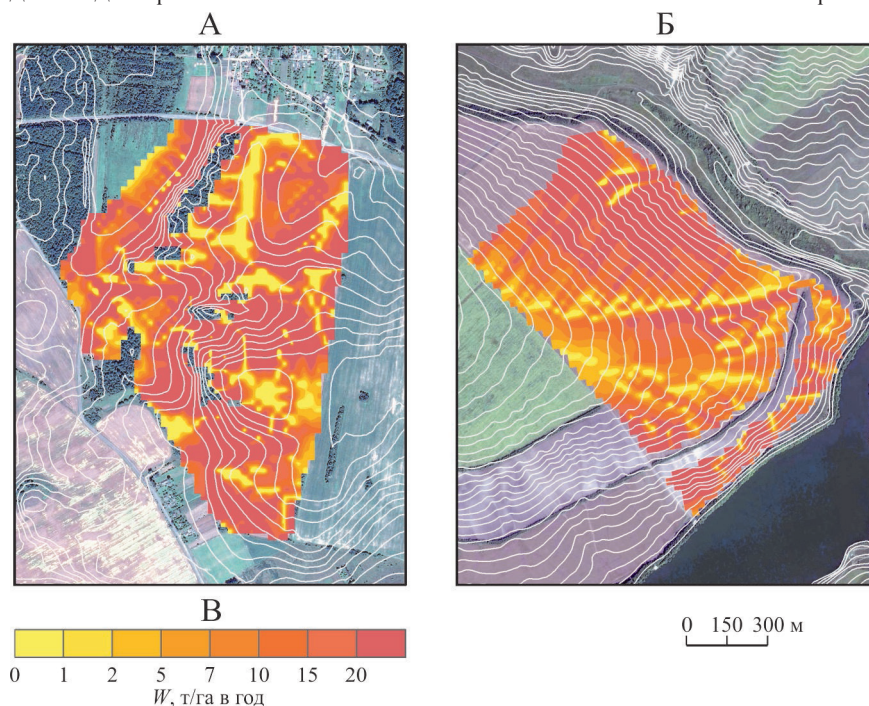


Рис. 9. Пространственные модели среднегодовых почвенных потерь от ливневой эрозии с чистого пара (на основе ЦМР FABDEM): А — ключевой участок в Брестской обл.; Б — ключевой участок в Белгородской обл.; В — градиенты потенциальных потерь почвы W , т/га·год

Fig. 9. Spatial models of average annual soil losses from rainwater erosion from pure steam (based on the FABDEM DEM)

Таблица 3. Распределение площадей (% от площади участка) по грациям темпов эрозионных потерь

Table 3. Area distribution (% of the site area) by gradation of erosion loss rates

Участок	Распределение пашни по эрозионным потерям, т/га·год, %							
	0–1	1–2	2–5	5–7	7–10	10–15	15–20	>20
Беларусь, Брестская обл.	21.8	0.1	2.0	3.1	4.8	10.0	10.5	47.7
Россия, Белгородская обл.	10.0	0	5.4	8.6	12.5	17.2	15.1	31.3

Таблица 4. Средневзвешенные значения эрозионных факторов для ключевых участков

Table 4. Weighted average values of erosion factors for key areas

Область	Брестская область	Белгородская область
Осадки: <i>R</i> -фактор	8	8
Почвы: <i>K</i> -фактор	3.54	1.31
Растительность: <i>C</i> -фактор	1	1
Рельеф: <i>LS</i> -фактор		
FABDEM	0.92	1.48
Sentinel-1	0.89	1.21
LiDAR	0.76	—
Среднегодовые темпы почвенных потерь, полученные на основе использования разных ЦМР (<i>W</i> , т/га·год)		
FABDEM	32.4	16.1
Sentinel-1	31.1	13.0
LiDAR	26.6	—

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Недоучет агроэкологического состояния эродированного почвенного покрова сельскохозяйственных земель зачастую приводит к тому, что соотношение агроценозов и сохранившихся естественных ценозов превышает уровень, соответствующий экологическому равновесию. Это обуславливает ускоренную деградацию почв, поступательные разрушения и обеднение агроэкосистем независимо от физико-географического положения. Моделирование результатов эрозии почв, которая является важнейшим фактором, осложняющим экологическую ситуацию и резко снижающим эффективность использования обрабатываемых земель водораздельных территорий, лежит в основе адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Проявление факторов водной эрозии в различных регионах имеет выраженные географические закономерности, что предопределяет необходимость применения современных геоинформационных технологий и алгоритмов математического моделирования. Результаты выполненных

исследований составляют пространственную основу для формирования сбалансированной структуры посевов и внедрения почвозащитных севооборотов на распаханых территориях Брестской области Беларуси и Белгородской области России. Модели вероятных потерь продукционной способности почв ключевых участков указывают на очередность принятия различных, в том числе дорогостоящих, мер по борьбе с водной эрозией и ее предотвращению, предпринимаемых ради получения нормальных урожаев сельскохозяйственных культур с сохранением обоснованной себестоимости их производства.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, и в рамках выполнения НИР БРФФИ-РНФ № Х26РНФ-008 от 27.01.2026.

ЛИТЕРАТУРА

Атлас почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / Под ред. В.В. Лапа, А.Ф. Черныша. Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии. 2017. 170 с.

Барабанов А.Т., Панов В.И. К вопросу о прогнозе поверхностного стока талых вод в лесостепной и степной зонах // Аридные экосистемы. 2012. № 4(53). С. 22–27.

Гафуров А.М. Эрозионный фактор рельефа Европейской России: открытый доступ и портал актуальной геоинформации // Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов). М.: МГУ. 2024.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году». М. 2022. 684 с.

<https://2021.ecology-gosdoklad.ru/>

Иванов М.А., Прищепов А.В., Голосов В.Н., Залялиев Р.Р., Ефимов К.В., Кондратьева А.А., Киняшова А.Д., Ионова Ю.К. Изменения площади пахотных угодий в бассейнах рек Европейской территории России за период 1985–2015 гг. как фактор динамики эрозии почв // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 149–157.

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-149-157>

Каштанов А.Н., Шишов Л.Л., Кузнецов М.С., Кочетов И.С. Проблемы эрозии и охраны почв России // Почвоведение. 1999. № 1. С. 97–105.

Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.

Лукин С.В., Верютина О.С., Корнейко Н.И., Малыгин А.В. Влияние водной эрозии почв на основные агрохимические свойства пахотных почв Белгородской области // Достижения науки и техники АПК. 2008. № 9. С. 7–8.

Соловиченко В.Д., Тютюнов С.И. Почвенный покров Белгородской области и его рациональное использование. Белгород: Отчий край, 2013. 371 с.

Тютюнов С.И., Соловиченко В.Д., Татаринцев Р.Ю. Агроэкология почв Белгородской области // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2004. Вып. 3. № 3–1. С. 23–24.

Цыбулько Н.Н. Водная эрозия почв сельскохозяйственных земель Беларуси // Журнал Белорус. гос. ун-та. Экология. 2022. № 3. С. 102–109.

Черныш А.Ф., Устинова А.М., Юхновец А.В. Современные почвенно-эрозионные процессы в Беларуси // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 6. М.: Географ. ф-т МГУ, 2015. С. 27–45.

Юхновец А.В., Устинова А.М. Приемы повы-

шения устойчивости почв к эрозии в условиях Республики Беларусь // Актуальные проблемы устойчивого развития агроэкосистем (почвенные, экологические, биоценотические аспекты): Всероссий. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 60-летию лаборатории агроэкологии Никитского ботанич. сада. Ялта: Ариал, 2019. С. 302–306.

Batista P.V., Davies J., Silva M.L., Quinton J.N. On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? // Earth-Science Reviews, 2019. Vol. 197. Art. 102898.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>

Bezak N., Mikoš M., Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Biddoccu M., Cerdà A. et al. Soil erosion modelling: A bibliometric analysis // Environmental Research. 2021. Vol. 197. Art. 111087.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111087>

Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerdà A., Chalise D. et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Science of the Total Environment, 2021. Vol. 780. Art. 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

Borrelli P., Ballabio C., Yang J.E., Robinson D.A., Panagos P. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion // Scientific Data, 2022. Vol. 9. Art. 406. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01489-x>

Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Van Oost K., Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // Nature Communications, 2017. Vol. 8(1). Art. 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

Buryak Z.A., Narozhnyaya A.G., Gusarov A.V., Beylich A.A. Solutions for the spatial organization of cropland with increased erosion risk at the regional level: A case study of Belgorod Oblast, European Russia // Land. 2022. Vol. 11. Art. 1492.

<https://doi.org/10.3390/land11091492>

Cendrero A., Remondo J., Beylich A., Cienciala P., Forte L., Golosov V., Gusarov A., Kijowska-Strugała M., Laute K., Li D., Navas A., Soldati M., Vergari F., Zwolinski Z., Dixon J., Knight J., Nadal-Romero E., Płaczowska E. Denudation and geomorphic change in the Anthropocene; a global overview // Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 233. Art. 104186.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104186>

Cowie A.L., Orr B.J., Castillo Sanchez V.M., Chasek P., Crossman N.D., Erlewein A., Louwagie G., Maron M., Metternicht G.I., Minelli S., Tengberg A.E., Walter S., Welton S. Land in balance: The scientific

- conceptual framework for Land Degradation Neutrality // *Environmental Science, Policy*, 2018. Vol. 7. P. 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
- García-Ruiz J.M., Beguería S., Nadal-Romero E., González-Hidalgo J.C., Lana-Renault N., Sanjuán Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world // *Geomorphology*, 2015. Vol. 239. P. 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
- Goloso V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., Safina G. Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain // *Land Degradation and Development*, 2018. Vol. 29(8). P. 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
- Gusarov A.V. Land-use/-cover changes and their effect on soil erosion and river suspended sediment load in different landscape zones of European Russia during 1970–2017 // *Water*, 2021. Vol. 13. Art. 1631. <https://doi.org/10.3390/w13121631>
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17 (2). Art. 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Jetten V., Govers G., Hessel R. Erosion models: quality of spatial predictions // *Hydrological Processes*, 2003. Vol. 17 (5). P. 887–900. <https://doi.org/10.1002/hyp.1168>
- Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // *International Journal of Digital Earth*, 2014. Vol. 7(3). P. 229–250. <https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380>
- Kirkby M.J., Irvine B.J., Jones R.J.A., Govers G., and PESERA team The PESERA coarse scale erosion model for Europe. Model rationale and implementation // *European Journal of Soil Science*, 2008. Vol. 59 (6). P. 1293–1306. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01072.x>
- Lisetskii F. Perspectives in soil organic carbon storage: From a global perspective to the possibilities of landscapes // *Environ. Anal. Eco. Stu.*, 2023. Vol. 10 (5). Art. 000748. <https://doi.org/10.31031/EAES.2023.10.000748>
- Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *Catena*, 2020. Vol. 195. Art. 104726. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS // *International Journal of Geographical Information Systems*. 1996. Vol. 10. P. 629–641.
- Moore I.D., Wilson J.P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation // *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992. Vol. 47. P. 423–428.
- Panagos P., Borrelli P., Matthews F., Liakos L., Bezak N., Diodato N., Ballabio C. Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070 // *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 610. Art. 127865. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127865>
- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements // *Land Use Policy*, 2012. Vol. 29 (2). P. 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>
- Petelko A.I., Goloso V.N., Belyaev V.R. Experience of design of system of countererosion measures // *Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation*. Moscow. 2007. P. 311–316.
- Senanayake S., Pradhan B., Alamri A., Park H.-J. A new application of deep neural network (LSTM) and RUSLE models in soil erosion prediction // *Sci. Total Environ*, 2022. Vol. 845. Art. 157220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157220>
- Sun Y., Zhang H., Yang Q. Rui Li, Liu B., Zhao X., Shi H., Li H., Ren Y., Fan X., Dong L., Xu Y., Chang Y., Yuan L. A new high-resolution global topographic factor dataset calculated based on SRTM // *Scientific Data*, 2024. Vol. 11. Art. 101. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-02917-w>
- Tan Z., Leung L.R., Li H.-Y., Cohen S. Representing global soil erosion and sediment flux in Earth System Models // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022. Vol. 14. Art. e2021MS002756. <https://doi.org/10.1029/2021MS002756>
- Tsymbarovich, P., Kust, G., Kumani, M., Goloso V., Andreeva, O. Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia // *International Soil and Water Conservation Research*, 2020. Vol. 8(4). P. 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>
- Wischmeier W.H, Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // *Agriculture Handbook*. Washington. 1978. No. 537. 58 p. <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>
- Xiong M., Sun R., Chen L. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type // *Geoderma*, 2019. Vol. 343. P. 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.013>
- Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A., Ivanov M.A., Gafurov A.M., Saveliev A.A., Shynbergenov E.A., Ermolaeva P.O., Bodrova A.O., Yantsitov R.O. Geography and geoecology of Russia in the mosaic of river basins // *Geography and Natural Resources*, 2023. Vol. 44(3). P. 208–214. <https://doi.org/10.1134/S1875372823030046>

ОБ АВТОРАХ

Червань Александр Николаевич — Белорусский государственный университет. Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. Заведующий кафедрой почвоведения и геоинформационных систем. chervanalex@mail.ru

Буряк Жанна Аркадьевна — ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Кандидат географических наук. Ведущий научный сотрудник НИЛ «Баланс С» Института экологии, биотехнологии и природопользования. buryakzh@gmail.com

Фруль Евгений Сергеевич — Белорусский государственный университет. Аспирант кафедры почвоведения и геоинформационных систем. Младший научный сотрудник УП «Геоинформационные системы». zhenyafrul@yandex.by

IMPROVING TECHNOLOGIES FOR AUTOMATED ASSESSMENT OF POTENTIAL SOIL WASHOUT FOR EROSIVELY HAZARDOUS AGRICULTURAL LANDSCAPES IN BELARUS AND THE BELGOROD REGION

A.N. Chervan^{1*}, J.A. Buryak^{2, 3}, E.S. Frul¹

¹*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

²*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

³*Belgorod State University, Belgorod, Russia*

*chervanalex@mail.ru

Annotation. Due to the agricultural transformation of landscapes, an increase in the rate of water erosion of soils is noted both at the global and national levels. In the CIS countries, water erosion is the most common type of degradation of agricultural land. Improving approaches to solving the problem of managing erosion-hazardous agro-landscapes involves the development of automated methods for assessing water erosion of a given spatial accuracy, taking into account all factors of land use.

The article presents the results of modeling the rates of water erosion at the regional level in the Brest region of the Republic of Belarus and the Belgorod region of the Russian Federation. A comparative analysis of the factors of erosion is given, including the example of the results of modeling water erosion in key areas. Global and local digital terrain models based on radar data, laser terrain scanning (lidar) data, and related software are taken into account when assessing topographic conditions. Based on calculations based on the model, potential soil losses due to stormwater erosion are estimated, including for different genetic types of soils — sod-podzolic and typical chernozems. The results obtained make it possible to determine the order of adoption of various, including expensive, measures to combat and prevent water erosion necessary to obtain sustainable crops while maintaining reasonable production costs.

Keywords: soil water erosion, potential erosion models, agrolandscape, remote sensing data, lidar survey

REFERENCES

Barabanov A.T., Panov V.I. On the issue of forecasting surface runoff of meltwater in forest-steppe and steppe zones. *Aridnye ekosistemy*. 2012. No. 4(53). P. 22–27. (In Russ.)

Batista P.V., Davies J., Silva M.L., Quinton J.N. On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? // *Earth-Science Reviews*, 2019. Vol. 197. Art. 102898.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>

Bezak N., Mikoš M., Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Biddoccu M., Cerdà A. et al. Soil erosion modelling: A bibliometric analysis // *Environmental Research*. 2021. Vol. 197. Art. 111087 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111087>

2021. 111087

Borrelli P., Alewell C., Alvarez P., Anache J.A.A., Baartman J., Ballabio C., Bezak N., Biddoccu M., Cerdà A., Chalise D. et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // *Science of the Total Environment*, 2021. Vol. 780. Art. 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

Borrelli P., Ballabio C., Yang J.E., Robinson D.A., Panagos P. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion // *Scientific Data*, 2022. Vol. 9. Art. 406. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01489-x>

Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Van Oost K., Mon-

- tanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // *Nature Communications*, 2017. Vol. 8(1). Art. 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Buryak Z.A., Narozhnyaya A.G., Gusarov A.V., Beylich A.A. Solutions for the spatial organization of cropland with increased erosion risk at the regional level: A case study of Belgorod Oblast, European Russia // *Land*. 2022. Vol. 11. Art. 1492. <https://doi.org/10.3390/land11091492>
- Cendrero A., Remondo J., Beylich A., Cienciala P., Forte L., Golosov V., Gusarov A., Kijowska-Strugała M., Laute K., Li D., Navas A., Soldati M., Vergari F., Zwolinski Z., Dixon J., Knight J., Nadal-Romero E., Płaczowska E. Denudation and geomorphic change in the Anthropocene; a global overview // *Earth-Science Reviews*. 2022. Vol. 233. Art. 104186. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104186>
- Chernysh A.F., Ustinova A.M., Yukhnovets A.V. Modern soil-erosion processes in Belarus // *Erozionnye i ruslovyie protsessy*. Iss. 6. Moscow: Geograf. f-t MGU, 2015. P. 27–45. (In Russ.)
- Cowie A.L., Orr B.J., Castillo Sanchez V.M., Chasek P., Crossman N.D., Erlewein A., Louwagie G., Maron M., Metternicht G.I., Minelli S., Tengberg A.E., Walter S., Welton S. Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality // *Environmental Science, Policy*, 2018. Vol. 7. P. 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
- Gafurov A.M. Erosion factor of the relief of European Russia: open access and portal of current geoinformation // *Erozionnye, ruslovyie i ust'evye protsessy (issledovaniya molodykh uchenykh universitetov)*. Moscow: MGU. 2024. (In Russ.)
- García-Ruiz J.M., Beguería S., Nadal-Romero E., González-Hidalgo J.C., Lana-Renault N., Sanjuán Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world // *Geomorphology*, 2015. Vol. 239. P. 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
- Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., Safina G. Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain // *Land Degradation and Development*, 2018. Vol. 29(8). P. 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/ldr.3061>
- Gusarov A.V. Land-use/-cover changes and their effect on soil erosion and river suspended sediment load in different landscape zones of European Russia during 1970–2017 // *Water*, 2021. Vol. 13. Art. 1631. <https://doi.org/10.3390/w13121631>
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17 (2). Art. 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Ivanov M.A., Prishchepov A.V., Golosov V.N., Zalyaliev R.R., Efimov K.V., Kondratyeva A.A., Kinyashova A.D., Ionova Yu.K. Changes in the area of arable land in the river basins of the European territory of Russia for the period 1985–2015 as a factor of soil erosion dynamics // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. Vol. 14. No. 6. P. 149–157. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-149-157> (In Russ.)
- Jetten V., Govers G., Hessel R. Erosion models: quality of spatial predictions // *Hydrological Processes*, 2003. Vol. 17 (5). P. 887–900. <https://doi.org/10.1002/hyp.1168>
- Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // *International Journal of Digital Earth*, 2014. Vol. 7(3). P. 229–250. <https://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380>
- Kashtanov A.N., Shishov L.L., Kuznetsov M.S., Kochetov I.S. Problems of erosion and soil protection in Russia // *Pochvovedenie*. 1999. No. 1. P. 97–105. (In Russ.)
- Kirkby M.J., Irvine B.J., Jones R.J.A., Govers G., and PESERA team The PESERA coarse scale erosion model for Europe. Model rationale and implementation // *European Journal of Soil Science*, 2008. Vol. 59 (6). P. 1293–1306. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01072.x>
- Lapa V.V., Chernysh A.F. (eds.) Atlas of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus. Minsk: Institut pochvovedeniya i agrokhimii. 2017. 170 p. (In Russ.)
- Larionov G.A. Soil erosion and deflation: basic patterns and quantitative estimates. Moscow: Izd-vo MGU, 1993. 200 p. (In Russ.)
- Lisetskii F. Perspectives in soil organic carbon storage: From a global perspective to the possibilities of landscapes // *Environ. Anal. Eco. Stu.*, 2023. Vol. 10 (5). Art. 000748. <https://doi.org/10.31031/EAES.2023.10.000748>
- Lukin S.V., Veryutina O.S., Korneyko N.I., Malygin A.V. Influence of water soil erosion on the main agrochemical properties of arable soils of the Belgorod region // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2008. No. 9. P. 7–8. (In Russ.)
- Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *Catena*, 2020. Vol. 195. Art. 104726. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. Modelling topographic potential for erosion and deposi-

tion using GIS // International Journal of Geographical Information Systems. 1996. Vol. 10. P. 629–641.

Moore I.D., Wilson J.P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation // Journal of Soil and Water Conservation, 1992. Vol. 47. P. 423–428.

Panagos P., Borrelli P., Matthews F., Liakos L., Bezak N., Diodato N., Ballabio C. Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070 // Journal of Hydrology. 2022. Vol. 610. Art. 127865.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127865>

Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements // Land Use Policy, 2012. Vol. 29 (2). P. 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>

Petelko A.I., Golosov V.N., Belyaev V.R. Experience of design of system of countererosion measures // Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation. Moscow. 2007. P. 311–316.

Senanayake S., Pradhan B., Alamri A., Park H.-J. A new application of deep neural network (LSTM) and RUSLE models in soil erosion prediction // Sci. Total Environ, 2022. Vol. 845. Art. 157220.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157220>

Solovichenko V.D., Tyutyunov S.I. Soil cover of the Belgorod region and its rational use. Belgorod: Otchiy kray, 2013. 371 p. (In Russ.)

State report “On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021”. Moscow. 2022. 684 p. URL:

<https://2021.ecology-gosdoklad.ru/> (In Russ.)

Sun Y., Zhang H., Yang Q. Rui Li, Liu B., Zhao X., Shi H., Li H., Ren Y., Fan X., Dong L., Xu Y., Chang Y., Yuan L. A new high-resolution global topographic factor dataset calculated based on SRTM // Scientific Data, 2024. Vol. 11. Art. 101.

<https://doi.org/10.1038/s41597-024-02917-w>

Tan Z., Leung L.R., Li H.-Y., Cohen S. Representing global soil erosion and sediment flux in Earth System Models // Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2022. Vol. 14. Art. e2021MS002756.

<https://doi.org/10.1029/2021MS002756>

Tsybulko N.N. Water erosion of soils of agricultural lands of Belarus // Zhurnal Belorus. gos. un-ta. Ekologiya. 2022. No. 3. P. 102–109. (In Russ.)

Tsymbarovich, P., Kust, G., Kumani, M., Golosov, V., Andreeva, O. Soil erosion: An important indicator for the assessment of land degradation neutrality in Russia // International Soil and Water Conservation Research, 2020. Vol. 8(4). P. 418–429.

<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.002>

Tyutyunov S.I., Solovichenko V.D., Tatarintsev R.Yu. Agroecology of soils of the Belgorod region // Izv. Orenburg. gos. agrar. un-ta. 2004. Iss. 3. No. 3–1. P. 23–24. (In Russ.)

Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agriculture Handbook. Washington. 1978. No. 537. 58 p.

<https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>

Xiong M., Sun R., Chen L. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type // Geoderma, 2019. Vol. 343. P. 31–39.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.013>

Yermolaev O.P., Mukharamova S.S., Maltsev K.A., Ivanov M.A., Gafurov A.M., Saveliev A.A., Shynbergenov E.A., Ermolaeva P.O., Bodrova A.O., Yantsitov R.O. Geography and geoecology of Russia in the mosaic of river basins // Geography and Natural Resources, 2023. Vol. 44(3). P. 208–214.

<https://doi.org/10.1134/S1875372823030046>

Yukhnovets A.V., Ustinova A.M. Techniques for increasing soil resistance to erosion in the conditions of the Republic of Belarus // Aktual'nye problemy ustoychivogo razvitiya agroekosistem (pochvennye, ekologicheskie, biotsenoticheskie aspekty): Vseross. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem. Yalta: Arial, 2019. P. 302–306. (In Russ.)

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out at the expense of the funds of the subsidy allocated as part of the state support of Kazan (Volga region) Federal University in order to increase its competitiveness among the world's leading scientific and educational centers, and as part of the implementation of research BRFFI-RNF No. X26RNF-008 dated 27.01.2026.

ABOUT THE AUTHORS

Chervan Alexander Nikolaevich — Belarusian State University. Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor. Head of the Department of Soil Science and Geoinformation Systems.

chervanalex@mail.ru

Buryak Zhanna Arkadevna — Kazan Federal University. PhD in Geography. Leading Researcher at the Research Laboratory “Balance C” of the Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management.

Frul Eugene Sergeevich — Belarusian State University. Postgraduate student of the Department of Soil Science and Geoinformation Systems. Junior Researcher at the UE “Geoinformation systems”. zhenyafrul@yandex.by

УДК 556.535.8:550.4

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ТРАССИРОВКИ ИСТОЧНИКОВ НАНОСОВ

Е.М. Гирло^{1,2*}, С.В. Харченко^{3,4}

¹ Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Лаборатория геохимии природных вод, Москва, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, Москва, Россия

⁴ Институт географии РАН, Москва, Россия

*kate.girlo.m@gmail.com

Поступила в редакцию 15.06.2026

После доработки 02.07.2026

Принята к публикации 03.07.2026

Аннотация. Различия в гранулометрическом составе проб источников и мишени искажают результаты оценки долевых вкладов источников поступления взвешенных наносов. Стандартный подход к устранению этого эффекта — введение весового коэффициента, пропорционального удельной площади поверхности частиц. Ранее этот коэффициент применялся ко всем элементам без исключения. Однако введение такой коррекции обосновано лишь для элементов, концентрации которых определяются сорбцией на поверхности частиц, она неприменима к элементам, входящим в кристаллические решетки минералов.

В настоящей работе предложен алгоритм гранулометрической коррекции концентраций химических элементов, в котором решение о применении поправки принимается для каждого элемента на основе двух критериев: 1) наличия значимой положительной средневзвешенной корреляции концентрации элемента с коэффициентом, пропорциональным удельной площади поверхности, и 2) геохимической принадлежности элемента (сорбционно-активный или матрично-связанный). Алгоритм апробирован на данных бассейна р. Сетунь (г. Москва) за 2019–2023 гг.: три группы источников (верхний горизонт почвы, дорожная пыль, береговые уступы) и взвешенные наносы в устье реки в качестве мишени. Кроме того, показано, что весовые коэффициенты, рассчитанные с использованием геометрического и арифметического среднего диаметра частиц, практически идентичны ($r = 0.99$). Для реализации расчетов подготовлены функции на языке R, опубликованные в открытом доступе на GitHub.

Ключевые слова: размер частиц, оценка долевых вкладов, сорбционно-активные элементы, матрично-связанные элементы, взвешенные наносы, р. Сетунь

DOI: 10.71367/3034-4638-2026-2-2-25-40

ВВЕДЕНИЕ

Метод трассировки источников наносов (фингерпринтинг — от англ. fingerprinting) основан на сопоставлении химического состава или иных количественных или качественных признаков взвешенных наносов в контрольной точке (мишени) с составом источников наносов на водосборе (Walling et al., 1999; Collins and Walling, 2002; Collins et al., 2020; Гирло и др., 2025). Под источниками наносов понимаются типы субстрата на водосборе, откуда наносы поступают в реку; мишень — это проба

наносов, представляющая смесь материала из различных источников (в данной работе — взвешенные наносы в устье р. Сетунь). Трассеры — это количественные характеристики наносов (концентрации химических элементов, радионуклиды, магнитная восприимчивость, цветовые характеристики и др.), позволяющие статистически различать их происхождение. В настоящей работе в качестве трассеров использованы концентрации химических элементов.

Одним из ключевых требований метода является консервативность трассеров, т. е. сохранение их характеристик при транспортировке от источника к мишени (Collins and Walling, 2002). Однако это условие может нарушаться под действием ряда процессов, происходящих при транспорте наносов от источника к мишени: гидродинамической сортировки частиц по крупности, поглощения элементов органическим веществом, окислительно-восстановительных реакций с переходом элементов в растворенную форму и обратно, а также дифференциального осаждения частиц в зависимости от плотности слагающих их минералов. Так, даже тонкодисперсные частицы тяжелых минералов оседают быстрее, чем более крупные зерна легких минералов (Koiter et al., 2013). Настоящая работа посвящена одному из этих факторов — влиянию различий в гранулометрическом составе проб источников и мишени на концентрации химических элементов. Взвешенные наносы, отобранные в реке, состоят из более тонкодисперсного материала по сравнению с наносами в источниках на водосборе. Это приводит к завышению концентраций элементов в мишени (Horowitz, 1985; Walling et al., 2000).

Различия в гранулометрическом составе между взвесью в реке и наносами в источниках существенны. Для бассейна р. Сетунь медианный диаметр взвешенных наносов в замыкающем створе составляет 0.032 мм, тогда как в дорожной пыли преобладают частицы крупнее 0.05 мм (около 70% массы), а в поверхностных почвах и материале береговых уступов доминирует фракция 0.01–0.05 мм (Денисова и др., 2026, в печати). Таким образом, взвесь обогащена более мелкими фракциями по сравнению с наносами в источниках. Это обуславливает необходимость гранулометрической коррекции.

Для устранения эффекта влияния гранулометрического состава на результаты оценки долевых вкладов источников поступления взвеси Walling et al. (1999) предложили ввести весовой коэффициент, пропорциональный удельной площади поверхности частиц (SSA — specific surface area, m^2/g), и применять его ко всем трассерам в пробах источников. В настоящей работе аналог этого коэффициента обозначен как W_{sum} . В отличие от SSA , W_{sum} является безразмерной величиной, поскольку рассчитывается на основе объемных долей фракций, а не абсолютных масс или объемов проб. W_{sum} пропорционален SSA и используется как относительная поправка для приведения концентраций источников к гранулометрическому составу мишени.

Корректность такой поправки для реализации метода трассировки источников наносов вызывает вопросы (Owens et al., 2016). Существуют два рас-

пространенных подходы для устранения влияния разного гранулометрического состава в источниках и в мишени на результаты оценки долевых вкладов: 1) фракционирование проб до узкого диапазона размеров (например, <63 мкм) (Malhotra et al., 2018) и 2) введение поправочных коэффициентов через удельную площадь поверхности. Однако ни один из этих способов не устраняет проблему полностью (Lacey et al., 2017).

Smith and Blake (2014) и Gaspar et al. (2022) показали, что применение поправки ко всем трассерам внутри источников может приводить к ложным результатам. По геохимическому поведению трассеры делятся на сорбционно-активные, концентрации которых определяются сорбцией на поверхности частиц и возрастают с увеличением удельной площади поверхности, и матрично-связанные (matrix-bound), входящие в кристаллические решетки устойчивых минералов (Collins et al., 2020). Положительная линейная связь концентрации элементов с W_{sum} характерна не для всех трассеров. Для матрично-связанных элементов (Collins et al., 2020) изменение концентраций определяется минералогическим составом, а не сорбцией, и применение к ним коэффициента, пропорционального удельной площади поверхности частиц, методологически некорректно.

Кроме того, Koiter et al. (2013) отметили, что процессы (гидродинамическая сортировка частиц, растворение, осаждение элементов и др.), происходящие между источником и мишенью, представляют собой слабо изученное звено метода трассировки источников наносов, и подчеркнули необходимость учета геохимического поведения каждого трассера при отборе и оценке консервативности.

Lacey et al. (2017) рекомендовали исследовать связь между размером частиц и свойствами каждого трассера до применения коррекции, однако численная реализация этой рекомендации ранее не была предложена. В настоящей работе предложен алгоритм гранулометрической коррекции концентраций химических элементов, основанный на анализе корреляции концентраций с W_{sum} для каждого химического элемента, а также учет геохимической принадлежности элемента. Алгоритм апробирован на примере данных мониторинга с 2019 по 2023 г. в бассейне р. Сетунь (Гирло и др., 2025).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика гранулометрической коррекции концентраций химических элементов рассмотрена на примере данных мониторинга бассейна р. Сетунь (правый приток р. Москвы), малого урбанизирован-

ного водосбора, расположенного в юго-западной части г. Москвы и на прилегающей территории Московской области. Площадь водосбора составляет около 190 км², длина р. Сетунь — 38 км. Большая часть бассейна занята селитебной и транспортной зоной землепользования, однако сохраняются и природные территории (лесопарки, ООПТ — около 3% площади). Около 38% площади бассейна состоит из водонепроницаемого покрытия (в т. ч. асфальтового) (Денисова и др., 2026, в печати).

Для выполнения гранулометрической коррекции концентраций химических элементов и дальнейшей реализации метода трассировки источников наносов необходимы пробы из потенциальных источников наносов и мишени (Гирло и др., 2025). Пробоотбор в бассейне р. Сетунь проводился в 2019–2023 гг., в ходе него были выделены три группы источников. Пробы поверхностного горизонта почв (0–10 см) отбирались лопаткой с участков открытого грунта (124 пробы). Дорожная пыль собиралась щеткой и совком с дорог различной категории и дворовых территорий (77 проб). Материал береговых уступов отбирался по вертикальному профилю берегового уступа на участках активной береговой эрозии (10 проб). В качестве мишени использованы пробы взвешенных наносов, отобранные в устье р. Сетунь путем фильтрования речной воды через мембранные фильтры с регулярностью около одного раза в месяц, а в периоды половодья и паводков — чаще (76 проб). В каждой группе источников и в мишени определялись гранулометрический состав наносов и концентрации химических элементов. Все расчеты, выполненные в рамках данной работы, основаны на следующем наборе данных: три группы источников (верхний горизонт почвы, дорожная пыль, береговые уступы) и взвешенные наносы с мембранных фильтров в качестве мишени.

Во всех пробах определены концентрации 54 химических элементов, включая макроэлементы, тяжелые металлы и металлоиды, щелочные и щелочноземельные металлы, редкоземельные и редкие элементы. Анализ выполнен методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-эмиссионной спектрометрии (ICP-AES).

Гранулометрический состав верхнего горизонта почв, береговых уступов, дорожной пыли и взвеси с фильтров определялся на лазерном гранулометре «Analysette 22 Laser klasse 1» фирмы «Fritsch». Для всех проб проведен гранулометрический анализ и получены объемные доли разных фракций в соответствии со следующей шкалой: 0.1–1, 1–5, 5–10, 10–50, 50–250, 250–1000, 1000–2500 мкм. Для

проб взвешенных наносов из реки, полученных с помощью фильтрования через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм, нижняя граница первой фракции фактически составляет 0.45 мкм.

Согласно Walling et al. (1999), мишень принимается за эталон, к гранулометрическому составу которого приводятся источники. Пробы мишени не корректируются, поскольку их гранулометрический состав отражает результат естественной гидродинамической сортировки при транспорте наносов и является характеристикой, которую модель сепарации смеси должна воспроизвести. Корректируются только концентрации в источниках: коэффициент k_g повышает их пропорционально разнице в удельной площади поверхности между мишенью и источником. Значение W_{sum} мишени входит в числитель k_g одинаково для всех групп источников, поэтому разлiчие нижней границы фракционирования (0.45 мкм для фильтрованной взвеси вместо 0.1 мкм для источников) изменяет абсолютные значения k_g пропорционально, но не влияет на соотношение между ними и, следовательно, на оценки долевых вкладов.

Стоит отметить, что для фракции >1000 мкм верхняя граница интервала (2500 мкм) задана условно, поскольку она определяется техническими характеристиками анализатора Analysette 22. Образцы верхних горизонтов почв с участков открытого грунта и дорожной пыли на водосборе, береговых уступов в зоне активной береговой эрозии и пробы взвеси, полученные либо с помощью фильтрования на мембранном фильтре, либо с помощью отбора из зонд-ловушки для взвешенных наносов (Чалов и др., 2021) в устье Сетуни, имеют разный гранулометрический состав. Разный размер отдельных зерен и статистическое распределение размеров в пробе в целом влияют на сорбционные характеристики наносов (Hogowitz, 1985; Walling et al., 2000). Обилие глинистых частиц приводит к значительному увеличению суммарной площади сорбирующей поверхности. В результате, когда для реализации метода трассировки источников наносов отбираются разноразмерные пробы, требуется введение поправки на гранулометрический состав.

Пробы взвешенных наносов, как правило, обогащены мелкими фракциями по сравнению с материалом из источников. Это приводит к повышению концентраций многих сорбирующихся элементов во взвеси по сравнению с источниками наносов (Walling et al., 1999). Как уже отмечалось выше, влияние различий в гранулометрическом составе наносов между группами источников и взвесью в реке иногда учитывается за счет ограничения фракцией <63 мкм (Malhotra et al., 2018; Collins and Walling, 2002), но для более точного сопоставления

проб из мишени с источниками требуется дополнительная гранулометрическая коррекция.

А.И. Перельман (1989) выделял различные формы нахождения химических элементов в земной коре. Применительно к задаче гранулометрической коррекции концентраций химических элементов важны две из них: 1) адсорбированные ионы на поверхности коллоидных и глинистых минералов — концентрации таких элементов определяются сорбцией на поверхности частиц (Collins et al., 2020) и возрастают с увеличением удельной площади поверхности и 2) элементы, входящие в узлы кристаллических решеток устойчивых минералов (циркон, апатит, монацит). Collins et al. (2020) определяет такие элементы как матрично-связанные (matrix-bound) и указывает, что такие элементы не участвуют в сорбционно-десорбционных процессах при транспорте наносов.

В настоящем исследовании к сорбционно-активным отнесены макроэлементы (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na), тяжелые металлы, металлоиды и другие сорбционно-активные микроэлементы (Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sc, Ti, V, W, Zn) (Kosheleva et al., 2018), а также щелочные и щелочноземельные металлы (Ba, Be, Cs, Li, Rb, Sr). К матрично-связанным отнесены редкоземельные элементы (Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Y, Yb), а также элементы (Hf, Nb, Ta, Th, Ti, U, Zr), входящие в кристаллические решетки устойчивых минералов (циркон, рутил, монацит, апатит). Гранулометрическая коррекция применяется только к элементам первой группы при условии значимой положительной корреляции их концентраций с W_{sum} .

Расчет весового коэффициента W_{sum}

Весовой коэффициент (W_{sum}) является основой для проведения гранулометрической коррекции концентраций химических элементов. Такая поправка заключается во введении к концентрациям химических элементов весового коэффициента (W_{sum}), обратно пропорционального отношению интегральной площади зерен пробы для единицы объема к среднему (или некоему иному условному единичному) значению. Таким образом, для проб, состоящих преимущественно из более мелких частиц, значения концентраций будут понижены, а для проб, состоящих из крупных частиц, — повышены пропорционально сорбирующей площади, приведенной к единице объема. Для массовой обработки данных химического состава проб разработан алгоритм на языке R, функции для расчета поправочных коэффициентов к концентрациям на

основе гранулометрического состава опубликованы на GitHub (<https://github.com/sergeikharchenko/sediment-gs-correction>).

Расчет W_{sum} выполняется поэтапно и включает вычисление среднего геометрического значения ожидаемого размера частиц, среднего объема частиц и их ориентировочного количества для каждой фракции. Каждый из этих шагов подробно описан ниже.

Гранулометрический состав взвешенных наносов, верхних горизонтов почв и береговых уступов характеризуется бимодальным распределением с максимумами в диапазонах 1–5 и 10–50 мкм. В поверхностных почвах и пробах береговых уступов доминирует фракция 10–50 мкм (36–39% объема), суммарная доля частиц крупнее 50 мкм составляет 19–35%. В дорожной пыли преобладают крупные фракции: около 70% массы приходится на частицы крупнее 50 мкм (Денисова и др., 2026, в печати).

Для каждого интервала размеров было рассчитано среднее геометрическое значение ожидаемого размера по формуле (1):

$$MGD_i = (D1_i \times D2_i)^{0.5}, \quad (1)$$

где MGD — среднее геометрическое значение диаметра частиц для каждой i -й фракции (от англ. mean geometric diameter, мкм); $D1$ и $D2$ — нижняя и верхняя границы диапазона размеров (мкм). Вычисление среднего геометрического значения вместо среднего арифметического обосновано тем, что внутри каждой фракции известны только граничные значения диаметра частиц, а не их распределение в интервале. Для величин с асимметричным распределением (например, логнормальным, когда в пробе преобладают мелкие частицы) среднее геометрическое является стандартной оценкой центральной тенденции, тогда как при неизвестном априори распределении наиболее обоснованным было бы применять среднее арифметическое. В настоящей работе в качестве основного принят расчет по среднему геометрическому, для контроля выполнен параллельный расчет по среднему арифметическому.

Параметры формы частиц остаются неизвестными, но для ориентировочной оценки суммарной площади в ряде работ (Collins et al., 2010; Lamba et al., 2015; Malhotra et al., 2018) используется сферическая аппроксимация их формы. Для глинистых частиц с выраженной формой пластинки реальная удельная площадь поверхности может быть выше расчетной, но поскольку W_{sum} является безразмерной величиной и применяется как относительная поправка (отношение W_{sum} мишени к W_{sum} источника), систематическая ошибка, связанная с аппроксимацией формы, частично компенсируется.

При известном среднем геометрическом значении предполагаемого диаметра частиц для каждой фракции можно рассчитать и средний объем каждой частицы:

$$MGV_i = (\pi/6) MGD_i^3, \quad (2)$$

где MGV — среднее предполагаемое значение объема частиц для каждой i -й фракции, куб. ед. (поскольку рассчитывается нормализованная поправка в отношении среднего значения, единицы измерения могут быть произвольными).

Зная средний объем одной частицы, можно оценить их примерное количество в каждой фракции, для этого объемная доля фракции в пробе делится на средний объем одной частицы:

$$NP_i = V_i/MGV_i, \quad (3)$$

где NP — ориентировочное число обломочных частиц в каждой i -й фракции; V — объем каждой i -й фракции в общем объеме пробы (%).

Для расчета суммарной площади поверхности частиц в каждой фракции необходимо знать удельную площадь поверхности, соответствующую каждой фракции. Величина средней площади частиц описывается выражением:

$$MGS_i = 4 \times \pi \times (0.5 \times MGD_i)^2 = \pi \times MGD_i^2, \quad (4)$$

где MGS_i — средняя предполагаемая площадь поверхности частиц для каждой i -й фракции, кв. ед.

Поскольку в расчете используются объемные доли фракций, а не абсолютные объемы проб, ориентировочное число обломочных частиц в каждой i -й фракции (NP) не равно реальному числу

частиц. Тем не менее они пропорциональны числу частиц в каждой фракции и соотношения между фракциями внутри пробы сохраняются. Этого достаточно для расчета весовых коэффициентов, пропорциональных суммарной площади сорбирующей поверхности.

Для упрощения интерпретации этой величины представим, что если бы объемы наносов по фракциям были выражены в абсолютных единицах (а не процентах/долях), например в мл, значение W_{sum} соответствовало бы суммарной площади поверхности зерен.

Весовой коэффициент для каждой фракции W_i равен произведению средней площади поверхности одной частицы на ориентировочное количество частиц в этой фракции (5):

$$W_i = MGS_i \times NP_i, \quad (5)$$

а для всей пробы (6):

$$W_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n W_i. \quad (6)$$

Полученные значения W_{sum} тем больше, чем большую долю объема занимают мелкие фракции. Физическая интерпретация этой величины возможна при оперировании объемами. Пример расчета для пробы дорожной пыли в бассейне р. Сетунь объемом твердого вещества 100 мл (0.1 куб. дм) приведен в таблице 1.

Таким образом, для пробы дорожной пыли в бассейне р. Сетунь, приведенной в примере, весовой коэффициент составил бы 60.6, что означает, что при объеме твердого вещества пыли в пробе 100 мл суммарная площадь поверхности обломочных зе-

Таблица 1. Расчет весового коэффициента (W_{sum}) на примере пробы дорожной пыли из бассейна р. Сетунь

Table 1. Calculation of the specific surface area (W_{sum}) for a road dust sample from the Setun River basin

Переменная	Фракция, мкм						
	<1	1–5	5–10	10–50	50–250	250–1000	>1000
Объемная доля, %	1.7	6.9	4.7	11.5	46.5	28.7	0
MGD, мкм	0.32	2.23	7.1	22.4	112	500	1580
MGV, мкм ³	17e-3	5.85	185	5850	73e4	65e6	2.1e9
MGS, мкм ²	0.31	15.7	157	1570	39e3	78e4	7.8e6
NP, усл. ед.	102.7	1.18	25e-3	2e-3	6.3e-5	4.4e-7	0
NP физ., шт.	102.7e12	1.18e12	25e9	2e9	6.3e7	4.4e5	0
W, усл. ед.	32.2	18.5	4.0	3,1	2.5	0.34	0
W физ., м ²	32.2	18.5	4.0	3,1	2.5	0.34	0
Wsum	60.6						

рен в интервале размеров от 0.1 до 2500 мкм равна 60.6 м². Как видим, при фиксированной величине объема частные коэффициенты для отдельных фракций строго пропорциональны условной величине, получаемой при работе с объемными долями (при выбранном объеме пробы 100 мл и единице измерения площади м² значения величин даже равны, в остальных случаях — пропорциональны).

В качестве альтернативы алгоритм позволяет рассчитать средний размер частиц внутри фракции и средним арифметическим. Для контроля устойчивости результатов расчет W_{sum} выполнен обоими способами: с использованием геометрического и арифметического среднего.

Значения W_{sum} , рассчитанные двумя способами, линейно связаны ($r = 0.99$), при этом арифметический вариант характеризуется меньшей дисперсией (в 1.5 раза) и вводит меньшую по величине поправку в значения концентраций, предполагая размеры частиц внутри каждой фракции равномерно распределенными. Поэтому взвешенные таким образом значения маркеров (и полученные на этой основе результаты оценки долевых вкладов источников наносов) можно расценивать как некую контрольную величину, на фоне основного подхода — расчета с использованием геометрического среднего.

После расчета весовых коэффициентов W_{sum} для каждой пробы необходимо провести контроль качества отобранных проб в мишени. Стоит отметить, что если в качестве мишени используются пробы из зонд-ловушек для взвешенных наносов (Чалов и др., 2021), то из дальнейшего расчета стоит исключить пробы, содержащие песчаный материал. Такие пробы не информативны и искажают оценки долевых вкладов. Это можно выполнить на основе анализа значений W_{sum} внутри мишеней: низкие значения характеризуют попадание в ловушки не тонкой взвеси, а песка.

Наличие видимого разрыва в значениях можно принять за порог, ниже которого пробы исключаются. Для дальнейших расчетов с зонд-ловушками среднее значение W_{sum} по мишени берется из скорректированной выборки.

Отбор химических элементов для гранулометрической коррекции

На основе рассчитанных значений W_{sum} необходимо определить, концентрации каких элементов подлежат гранулометрической коррекции. Применение поправки ко всем трассерам (Walling et al., 1999) может привести к ложным результатам оценок долевых вкладов источников (Gaspar et al., 2022; Smith and Blake, 2014), так как связь

концентрации элемента с W_{sum} характерна не для всех трассеров. Для матрично-связанных элементов изменение концентраций определяется минералогическим составом обломочных зерен, а не сорбцией на поверхности частиц. Применение корректирующего коэффициента к таким элементам не обосновано.

Для каждого элемента и каждого источника рассчитывается коэффициент линейной корреляции Пирсона между концентрацией элемента и значением W_{sum} по всем группам источников (рис. 1) через z-преобразование Фишера с весами ($n - 3$), где n — объем выборки группы. Такой подход дает интегральную оценку силы связи по всем группам и позволяет избежать проблемы множественных сравнений — отдельной оценки корреляции по группам и выбора правила агрегации.

Средневзвешенная корреляция учитывает различия в объемах выборок: группа почв (124 пробы) обладает наибольшей статистической мощностью, оказывает основное влияние на итоговую оценку, тогда как проб береговых уступов (10 проб) минимальное количество. Решение о применении гранулометрической коррекции принимается при $r \geq 0.3$, что соответствует нижней границе умеренного эффекта согласно классификации Коэна (Cohen, 1988).

При отрицательной корреляции между концентрацией элементов и W_{sum} (например, Си, Мо, Sb, W) элемент не подлежит гранулометрической коррекции. Отрицательная связь указывает на нахождение элемента в крупных минеральных зернах (например, циркон, рутил, касситерит и др.). Соответственно, корректировка на размер частиц через удельную площадь поверхности, предполагающая сорбционный механизм, в таком случае физически не обоснована. Аналогично не корректируются элементы, для которых знак корреляции с W_{sum} различается между группами источников (положительная в одной, отрицательная в другой), поскольку в таком случае единый поправочный коэффициент неприменим.

Таким образом, решение о применении гранулометрической коррекции принимается по двум критериям: 1) наличие положительной значимой корреляции и 2) геохимическая принадлежность элемента к сорбционно-активным.

Для данных по бассейну р. Сетунь по результатам корреляционного анализа и с учетом геохимической принадлежности в список элементов для гранулометрической коррекции вошли: Al, Cs, Li, Rb, Sc и Tl. Положительная корреляция концентраций этих элементов с W_{sum} может быть обусловлена как сорбцией на поверхности частиц, так и увеличением доли гли-

нистых минералов в тонких фракциях, в кристаллические решетки которых входит ряд перечисленных элементов (Al, Li, Rb). Вне зависимости от механизма рост концентраций с уменьшением крупности частиц обосновывает применение поправки.

Применение поправки

Отдельно для каждой группы источников и для мишени рассчитывается среднее значение W_{sum} . Затем необходимо рассчитать поправочные коэффициенты (k_g), которые вычисляются как отношение среднего W_{sum} мишеней к среднему W_{sum} соответствующей группы источников:

$$k_g = \frac{\overline{W}_{\text{sum}}^{\text{мишень}}}{\overline{W}_{\text{sum}}^{\text{источник}}} \quad (7)$$

В настоящей работе коэффициент k_g рассчитывается на основе средних значений W_{sum} по группам источников, а не индивидуально для каждой пробы. При применении индивидуальной коррекции ($k_g = W_{\text{sum}}(\text{мишень})/W_{\text{sum}}(\text{проба источника})$) возникает дополнительный шум, связанный с внутригрупповой вариабельностью гранулометрического состава, поэтому в настоящей работе используются средние значения W_{sum} по группам.

Отобранные ранее для корректировки химические элементы, точнее, их концентрации (C), умножаются на соответствующий групповой коэффициент (k_g):

$$C^* = C \times k_g \quad (8)$$

При более мелком гранулометрическом составе мишени по сравнению с источником коэффициент (k_g) > 1, что приводит к росту концентраций элементов в источнике. При обратной ситуации — концентрации в элементах источников снижаются.

Для реализации этих расчетов на языке R подготовлены функции, которые переводят часто используемую кумулятивную шкалу объемных (равно как и массовых) долей в интервальную шкалу и рассчитывают весовые коэффициенты W_{sum} каждой пробы.

Для оценки влияния гранулометрической коррекции на результаты оценок долевых вкладов источников наносов выполнено сравнение четырех вариантов расчета с использованием модели fingerPro (Lizaga et al., 2020): 1) без коррекции; 2) предложенный алгоритм с геометрическим средним; 3) предложенный алгоритм с арифметическим средним; 4) коррекция всех 54 элементов (Walling et al., 1999). Во всех вариантах использован единый набор из шести трассеров (Al, Cs, La, Th, Yb, Zr), включающий два сорбционно-активных и четыре

матрично-связанных элемента. Единый набор необходим для того, чтобы изолировать влияние способа коррекции на результат: при индивидуальном наборе для каждого варианта различия в оценках долевых вкладов могут быть обусловлены как самой коррекцией, так и изменением состава трассеров.

Результаты применения коррекции

Гранулометрический анализ показывает значительные различия в крупности частиц между группами источников, а также между источниками и мишенью (Денисова и др., 2026, в печати). Весовой коэффициент (W_{sum}) распределен крайне неравномерно между источниками и мишенью (рис. 2). Для взвешенных наносов в реке характерны более высокие значения W_{sum} по сравнению с источниками на водосборе, так как взвесь в реке больше обогащена тонкодисперсными фракциями. Значения W_{sum} для взвеси в устье реки в 1.5–4 раза превышают значения для источников. Это означает, что удельная площадь сорбирующей поверхности частиц в мишени существенно больше, чем в источниках, что приводит к повышению концентраций сорбционно-активных элементов во взвеси по сравнению с материалом источников на водосборе.

В некорректированных данных для 32 элементов из 54 медианные концентрации в мишени превышают значения во всех группах источников, что может быть обусловлено как гранулометрическими различиями, так и иными факторами (техногенные поступления, окислительно-восстановительные реакции). После введения поправки число таких элементов сокращается до 27: для пяти из шести корректируемых элементов (Al, Cs, Li, Rb, Sc) концентрации в источниках возрастают и превышают значения в мишени. Оставшиеся 27 элементов не подлежат гранулометрической коррекции, поскольку их обогащение в мишени не связано с удельной площадью поверхности частиц. Элементы, не удовлетворяющие условию консервативности (range test; Lizaga et al., 2020), исключаются из набора для оценки долевых вкладов.

Для оценки эффекта применения гранулометрической коррекции выполнено сравнение распределений концентраций химических элементов до и после введения поправки. На рис. 3 приведено сравнение распределений концентраций шести элементов (Al, Cs, Li, Rb, Sc, Tl) по источникам и в мишени до и после введения гранулометрической поправки. До коррекции концентрации в мишени систематически превышают значения во всех группах источников, что подтверждает обогащение взвеси тонкодисперсными фракциями. После введения поправки на гранулометрический состав наносов значения в ми-

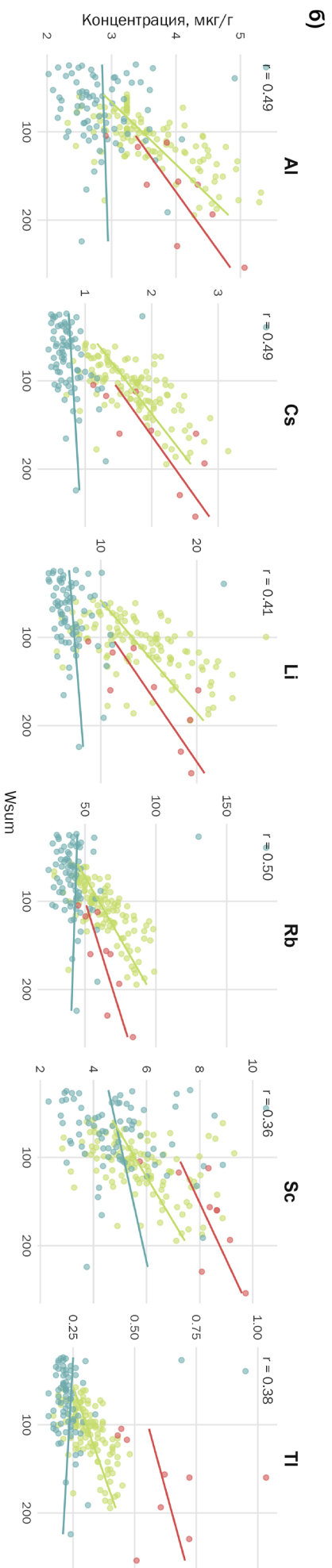
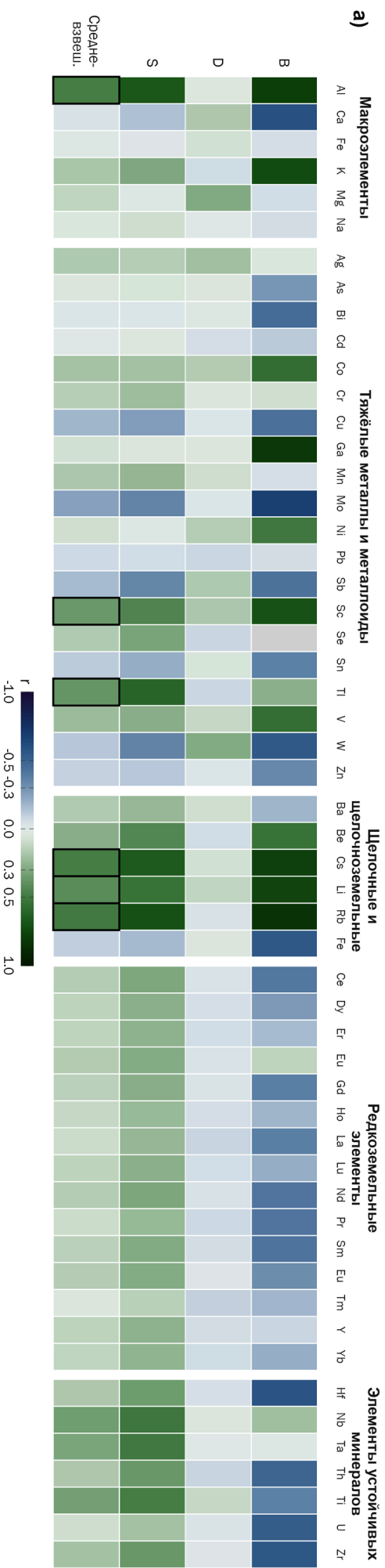


Рис. 1. Связь концентраций химических элементов с весовым коэффициентом W_{sum} . а) Коэффициенты корреляции между концентрациями 54 элементов и W_{sum} по группам источников (B — береговые уступы, D — дорожная пыль, S — поверхностные почвы) и средневзвешенная корреляция. Рамкой выделены элементы, отобранные для granulometric сорбционной коррекции ($r \geq 0.30$, сорбционно-активные). б) Связь концентраций шести отобранных элементов с W_{sum} по группам источников. Указаны значения средневзвешенной корреляции.

Fig. 1. Correlation between chemical element concentrations and the weighting coefficient W_{sum} . а) Correlation coefficients between concentrations of 54 elements and W_{sum} for source groups (B — river banks, D — road dust, S — topsoils) and weighted mean correlation. Elements selected for particle size correction ($r \geq 0.30$, sorption-active) are outlined. б) Correlation between concentrations of six selected elements and W_{sum} by source group. Weighted mean correlation values are shown.

шени выравниваются и попадают в диапазон между концентрациями в источниках, что свидетельствует о восстановлении условия консервативности для выбранных элементов. Концентрации в источниках возрастают пропорционально их коэффициентам k_g , и различия между группами источников сохраняются. Для каждого из перечисленных элементов как минимум один источник отличается от остальных по распределению концентраций (рис. 3), что подтверждает информативность этих элементов для трассировки источников наносов.

Результаты четырех вариантов моделирования демонстрируют два ключевых различия (табл. 2). Во-первых, предложенный алгоритм (варианты 2 и 3) перераспределяет долевые вклады по сравнению с расчетом без коррекции (вариант 1): доля дорожной пыли возрастает с 2.5 до 19.3%, а доля почв снижается с 47.4 до 30.3%, тогда как вклад береговых уступов остается стабильным (~50%).

Во-вторых, коррекция всех 54 элементов по Walling et al. (1999) (вариант 4) приводит к нереалистичной оценке: вклад одного источника (почвы) составляет 99.1%, что физически неправдоподобно для водосбора, где установлено активное развитие береговой эрозии (Денисова и др., 2026, в печати). Таким образом, безусловная коррекция матрично-связанных элементов разрушает дискриминирующую способность набора трассеров.

Al без коррекции не проходит тест на консервативность, что искажает результаты моделирования долевых вкладов. После введения поправки скорректированные концентрации Al возрастают в источниках, и все 76 проб мишени оказываются в пределах диапазона источников. Кроме того, стандартное отклонение для береговых уступов снижается с 21.0 до 11.3%, что указывает на стабилизацию оценок после устранения различий в размерности гранулометрического состава наносов.

Таблица 2. Результаты оценки долевых вкладов источников взвешенных наносов в р. Сетунь по модели fingerPro при четырех вариантах гранулометрической коррекции. Трассеры: Al, Cs, La, Th, Yb, Zr. В – береговые уступы, D – дорожная пыль, S – верхний горизонт почв. Указаны средние значения ± стандартное отклонение по 76 пробам мишени

Table 2. Source apportionment results for suspended sediments in the Setun River based on the fingerPro model with four variants of particle size correction. Tracers: Al, Cs, La, Th, Yb, Zr. B – river banks, D – road dust, S – topsoils. Mean values ± SD across 76 target samples

Вариант коррекции	GOF	B, %	D, %	S, %
1 – без коррекции	0.95 ± 0.02	50.1 ± 21.0	2.5 ± 11.5	47.4 ± 20.5
2 – предложенный алгоритм (геометрическое среднее)	0.95 ± 0.01	50.4 ± 11.3	19.3 ± 25.1	30.3 ± 17.9
3 – предложенный алгоритм (арифметическое среднее)	0.95 ± 0.01	49.9 ± 11.3	19.3 ± 25.2	30.9 ± 18.3
4 – коррекция всех 54 элементов (согласно Walling et al., 1999)	0.98 ± 0.00	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.0	99.1 ± 0.1

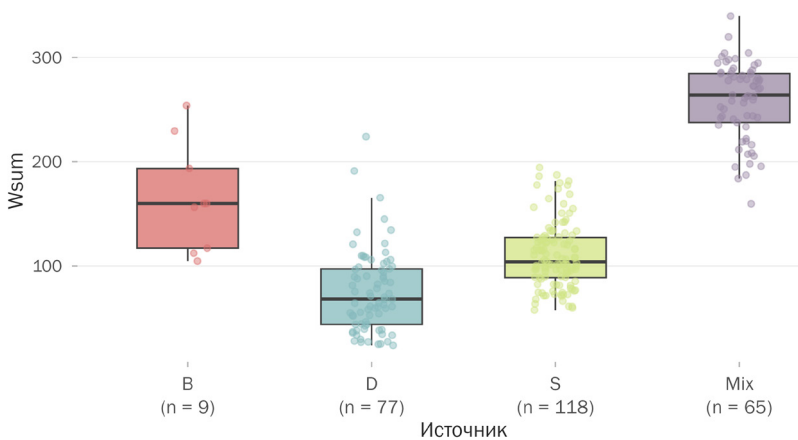


Рис. 2. Статистическое распределение значений весового коэффициента (W_{sum}) в источниках на водосборе и в мишени р. Сетунь. В – береговые уступы, D – дорожная пыль, S – верхний горизонт почв, Mix – взвешенные наносы в устье, n – количество отобранных проб

Fig. 2. Distribution of specific surface area values (W_{sum}) for source groups and target samples in the Setun River basin. B – river bank, D – road dust, S – topsoils, Mix – suspended sediments, n – the number of collected samples

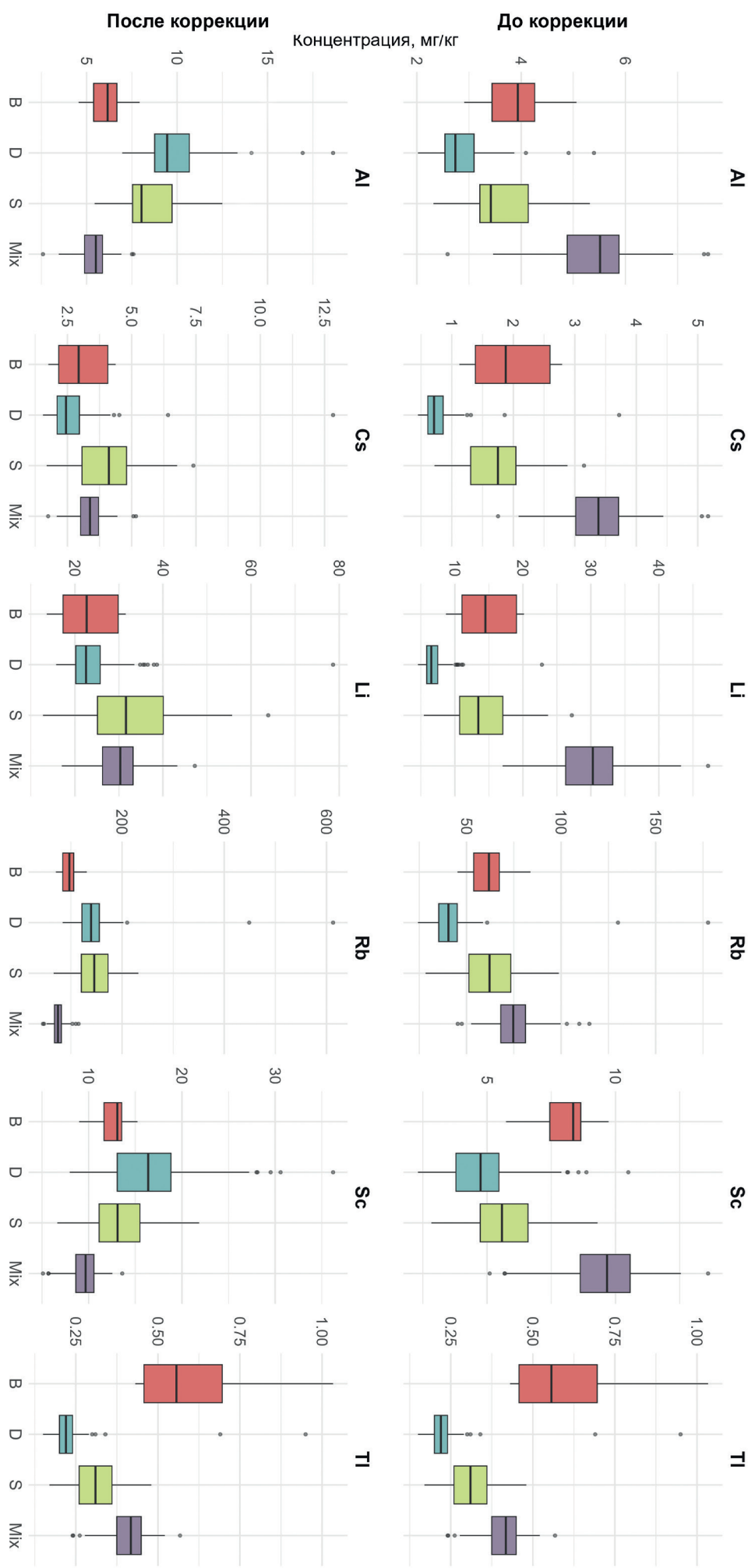


Рис. 3. Распределение концентраций элементов по группам источников и мишеней до и после гранулометрической коррекции. В — береговые уступы, D — дорожная пыль, S — верхний горизонт почв, Mix — взвешенные наносы

Fig. 3. Element concentrations in source groups and target samples before and after particle size correction. B — river banks, D — road dust, S — topsoils, Mix — suspended sediment

Способ усреднения диаметра частиц внутри фракции (геометрическое или арифметическое среднее) практически не влияет на оценки долевых вкладов источников наносов (варианты 2 и 3); различия в долевых вкладах не превышают 1 п.п. Коэффициент корреляции Пирсона между двумя рядами W_{sum} составляет $r = 0.99$ (рис. 4), а уравнение связи (W_{sum} (арифметическое среднее) = $0.67 \times W_{\text{sum}}$ (геометрическое среднее) + 0.55) указывает на меньшую дисперсию арифметических значений (в 1.5 раза) и несколько меньшую амплитуду поправки. Совпадение итоговых оценок при двух вариантах усреднения дополнительно подтверждает устойчивость предложенного алгоритма.

Следует отметить, что близость значений W_{sum} , рассчитанных двумя способами, обусловлена большим числом размерных градаций при фракционировании (7 фракций): чем больше интервалов, тем ближе геометрическое и арифметическое среднее внутри каждого из них. При грубом фракционировании (например, глина, алевроит и песок) различия между двумя оценками могут быть существенными.

Применение коэффициента W_{sum} ко всем 54 элементам без учета их геохимической особенности (Walling et al., 1999) приводит к абсолютному доминированию одного источника в долевых вкладах — доля почв в варианте 4 составляет 99.1%, тогда как вклады береговых уступов и дорожной пыли — около 0.4%. Такие результаты выглядят неправдоподобно в связи с тем, что на водосборе р. Сетунь активная береговая эрозия подтверждена натурными наблюдениями (Денисова и др., 2026, в печати). Безусловно, при ином наборе трассеров, например, состоящем целиком из сорбционно-активных элементов, коррекция всех элементов не привела бы к такому сильному искажению оценок.

Используемый набор трассеров (Al, Cs, La, Th, Yb, Zr) включает как сорбционно-активные, так и матрично-связанные элементы и является типичным для оценки долевых вкладов источников наносов, так как статистические тесты отбора трассеров (CI, CR, DFA) не учитывают геохимическую принадлежность элементов. Вариант 4 демонстрирует риск безусловной коррекции в таких условиях.

Стоит отметить, что критерий качества модели GOF (от англ. Goodness of Fit) (Motha et al., 2003) высокий во всех вариантах расчета (0.95–0.98), в том числе и в варианте 4 с физически неправдоподобным результатом. Высокий GOF во всех вариантах расчета, включая физически неправдоподобный вариант 4, указывает на то, что GOF отражает лишь математическое соответствие модели данным и не является достаточным критерием корректности оценки долевых вкладов.

$$GOF = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \left(\frac{|b_i - \sum_{j=1}^m x_j a_{i,j}|}{\Delta_i} \right)^2 \right\}, \quad (9)$$

где $a_{i,j}$ — средняя концентрация трассера i в источнике j ($j = 1$ до m); b_i — концентрация трассера i ($i = 1$ до n) в целевом образце;

x_j — относительный вклад источника j в целевой образец;

m — количество потенциальных источников наносов;

n — количество трассеров.

Таким образом, предложенный алгоритм гранулометрической коррекции обладает тремя преимуществами по сравнению с применением поправки ко всем элементам или вовсе ее отсутствием: 1) восстановление условия консервативности для сорбционно-активных трассеров; 2) сохранение дискриминирующей способности матрично-связанных трассеров и 3) снижение разброса по каждому источнику в оценках долевых вкладов.

Согласно Gaspar et al. (2022), гранулометрический эффект неоднороден по элементам и зависит от минералогического состава источников, то есть от геохимической принадлежности элемента. Однако алгоритм, позволяющий разделить элементы на подлежащие и не подлежащие коррекции, ранее не был предложен. Предложенный в настоящей работе двухэтапный подход гранулометрической коррекции заполняет этот пробел: 1) учитывается средневзвешенная корреляция концентраций трассеров с W_{sum} , а также 2) геохимическая принадлежность элементов.

Единый поправочный коэффициент, например, для сорбционно-активных элементов завышал бы концентрации для одних элементов и занижал для других (Koiter et al., 2013); из 32 сорбционно-активных элементов в данных по бассейну Сетуни только 6 показывают значимую положительную корреляцию с W_{sum} ($r \geq 0.3$), а остальные 26 с отрицательной корреляцией были бы ошибочно скорректированы при безусловном применении поправки только к сорбционно-активным элементам.

Предложенный подход имеет ряд ограничений. Выборки источников существенно различаются по объему: береговые уступы представлены 10 пробами, тогда как почвы — 124, а дорожная пыль — 77. Вследствие этого при расчете средневзвешенной корреляции с весами ($n - 3$) вклад береговых уступов в итоговую оценку составляет менее 5%. Кроме того, классификация элементов по геохимической принадлежности основана на форме их нахождения в земной коре (Перельман, 1989). Однако в условиях урбанизированного

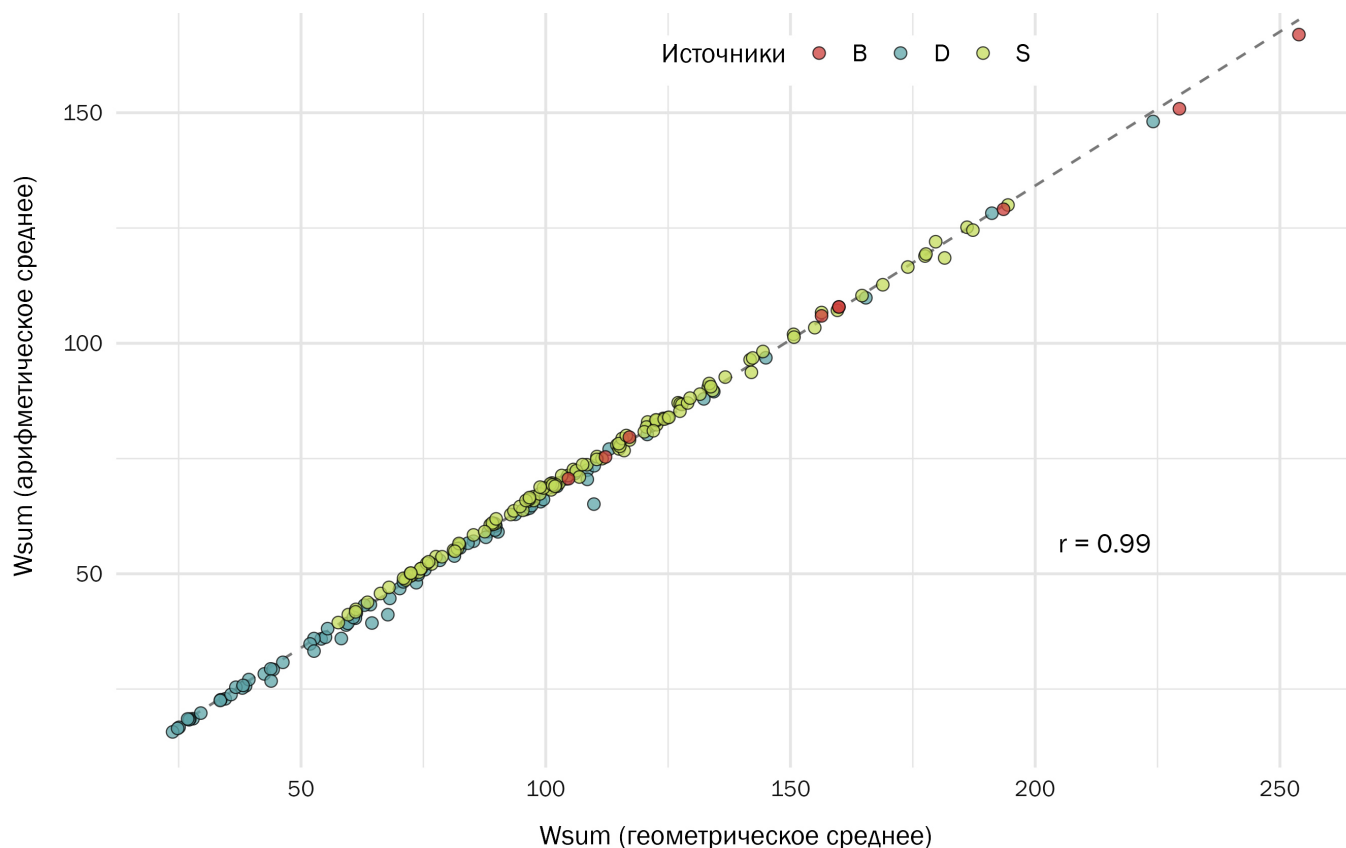


Рис. 4. Связь значений весового коэффициента W_{sum} , рассчитанных с использованием геометрического и арифметического среднего диаметра частиц. Источники наносов: В — береговые уступы, D — дорожная пыль, S — верхний горизонт почв

Fig. 4. Correlation between W_{sum} values calculated with geometric and arithmetic mean particle diameter. Sediment sources: B — river bank, D — road dust, S — topsoils

водосбора часть матрично-связанных элементов может дополнительно присутствовать в сорбированной форме за счет техногенных поступлений (атмосферные выпадения, промышленные стоки), что размывает границу между геохимическими группами. Этот эффект требует дополнительного изучения.

Также пороговое значение $r = 0.3$, принятое по классификации силы корреляционной связи (Cohen, 1988), является условным. Влияние изменения порогового значения на оценки долевых вкладов требует отдельного анализа.

Кроме того, элементы с выраженной отрицательной корреляцией концентраций с W_{sum} (что может указывать на их преимущественное нахождение в крупных обломочных зернах) в настоящем алгоритме не корректируются. Теоретически для таких элементов возможна обратная коррекция, однако ее обоснование и реализация требуют отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм гранулометрической коррекции концентраций химических элементов в пробах источников наносов для реализации метода трассировки источников наносов. В отличие от классического подхода (Walling et al., 1999), в котором коэффициент W_{sum} применяется ко всем трассерам без исключения, в предложенном алгоритме решение о коррекции принимается для каждого элемента на основе двух критериев: 1) наличия значимой положительной средневзвешенной корреляции концентрации химического элемента с W_{sum} ($r \geq 0.3$) и 2) геохимической принадлежности элемента. Сорбционно-активные элементы — подлежат коррекции, а матрично-связанные элементы (Collins et al., 2020) не корректируются, поскольку изменение их концентраций определяется минералогическим составом, а не сорбцией.

На примере данных бассейна р. Сетунь за 2019–2023 гг. показано, что предложенный алгоритм

восстанавливает свойство консервативности для сорбционно-активных трассеров и не нарушает способность различать источники для матрично-связанных трассеров. Кроме того, установлено, что выбор способа усреднения диаметра частиц, геометрическое или арифметическое среднее, не влияет на результаты ($r = 0.99$). Гранулометрическая коррекция всех 54 элементов согласно Walling et al. (1999), включая матрично-связанные элементы, приводит к сильному искажению результатов модели сепарации смеси (99.1% вклад одного источника). Это подтверждает необходимость геохимически обосновывать отбор элементов для коррекции.

ЛИТЕРАТУРА

- 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. С. 26–51.
<https://doi.org/doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-26-51>
- Денисова И.С., Кобыльченко Л.В., Гирло Е.М., Чалов С.Р. Пространственно-временные закономерности формирования стока наносов малых рек Московского региона (бассейн р. Сетунь) // Известия РАН. Серия географическая. 2026. (в печати).
- Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
- Харченко С.В. Sediment-gs-correction: функции R для гранулометрической коррекции концентраций химических элементов. 2025. [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/sergeikharchenko/sediment-gs-correction> (дата обращения: 09.06.2026).
- Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Тришин А.Ю., Пашкина М.С. Зонд-ловушка для взвешенных наносов: патент на полезную модель РФ RU 201927 U1. 2021. Заявл. 25.05.2020; опубл. 21.01.2021, Бюл. № 3.
- Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum. 1988. P. 567. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Collins A.L., Blackwell M., Boeckx P., Chivers C.A., Emelko M., Evrard O., Foster I., Gellis A., Gholami H., Granger S., Harris P., Horowitz A.J., Laceby J.P., Martinez-Carreras N., Minella J., Mol L., Nosrati K., Pulley S., Silins U., da Silva Y.J., Stone M., Tiecher T., Upadhayay H.R., Zhang Y. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes // Journal of Soils and Sediments. 2020. Vol. 20. P. 4160–4193.
<https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4>
- Collins A.L., Walling D.E. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins // Journal of Hydrology. 2002. Vol. 261. P. 218–244.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00011-2)
- Collins A.L., Walling D.E., Webb L., King P. Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information // Geoderma. 2010. Vol. 155. P. 249–261.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.008>
- Gaspar L., Blake W.H., Lizaga I., Latorre B., Navas A. Particle size effect on geochemical composition of experimental soil mixtures relevant for unmixing modelling // Geomorphology. 2022. Vol. 403. P. 108178.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108178>
- Horowitz A.J. A primer on trace metal-sediment chemistry. 1985. P. 72.
<https://doi.org/10.3133/wsp2277>
- Koiter A.J., Owens P.N., Petticrew E.L., Lobb D.A. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins // Earth-Science Reviews. 2013. Vol. 125. P. 24–42. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.009>
- Laceby J.P., Evrard O., Smith H.G., Blake W.H., Olley J.M., Minella J.P.G., Owens P.N. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review. // Earth-Science Reviews. 2017. Vol. 169. P. 85–103.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.009>
- Lamba J., Karthikeyan K.G., Thompson A.M. Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting // Geoderma. 2015. P. 239–240.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024>
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment // Water Resources Management. 2020. Vol. 34. P. 3879–3894.
<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0>
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. Consensus ranking as a method to identify non- conservative and dissenting tracers in fingerprinting studies // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 720. P. 137537.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137537>
- Malhotra K., Lamba J., Srivastava P., Shepherd S. Fingerprinting Suspended Sediment Sources in an Urbanized Watershed // Water. 2018. Vol. 10. P. 1573.
<https://doi.org/10.3390/w10111573>
- Motha J.A., Wallbrink P.A., Hairsine P.B., Grayson R.B. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia //

Water Resources Research. 2003. Vol. 39.

<https://doi.org/10.1029/2001WR000794>

Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A.J., Lobb D.A., Petticrew E.L., Reiffarth D.G., Smith H.G., Woodward J.C. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications. // Earth-Science Reviews. 2016. Vol. 162. P. 1–23.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>

Smith H.G., Blake W.H. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections // Geomorphology. 2014. Vol. 204. P. 177–191.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.003>

Walling D.E., Owens P.N., Leeks G.J.L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK // Hydrol. Process. Vol. 13. 1999. P. 955–975.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199905\)13:7<955::AID-HYP784>3.0.CO;2-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<955::AID-HYP784>3.0.CO;2-G)

Walling D.E., Owens P.N., Waterfall B.D., Leeks

G.J.L., Wass P.D. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK // Science of The Total Environment. 2000. P. 251–252.

[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00384-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00384-3)

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнены в рамках проекта РНФ № 25-17-00073.

ОБ АВТОРАХ

Гирло Екатерина Михайловна, аспирант, инженер, группа гидрогеохимии речных бассейнов, Институт водных проблем РАН; младший научный сотрудник, Лаборатория геохимии природных вод, МГУ им. М.В. Ломоносова;

e-mail: kate.girlo.m@gmail.com

Харченко Сергей Владимирович, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра геоморфологии и палеогеографии, географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова; научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева, МГУ им. М.В. Ломоносова; старший научный сотрудник, лаборатория геоморфологии, Институт географии РАН;

e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

PARTICLE SIZE CORRECTION OF CHEMICAL ELEMENT CONCENTRATIONS IN SEDIMENT SOURCE FINGERPRINTING

E.M. Girlo^{1,2*}, S.V. Kharchenko^{3,4}

¹ Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Laboratory of Natural Water Geochemistry, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, N.I. Makkaveev Research
Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Moscow, Russia

⁴ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*kate.girlo.m@gmail.com

Abstract. Particle size differences between source and target samples distort source apportionment results in suspended sediment fingerprinting. The standard approach to eliminating this effect is the application of a weighting coefficient proportional to the specific surface area of particles (W_{sum}). Previous studies applied W_{sum} to all elements without exception. However, such a correction is valid only for elements whose concentrations are controlled by sorption onto particle surfaces and is not applicable to elements incorporated into mineral crystal lattices.

In this study, we propose a selective particle size correction algorithm in which the decision to apply the correction is made for each element individually based on two criteria: a significant positive weighted-mean correlation between element concentration and W_{sum} , and the geochemical affinity of the element (sorption-controlled or matrix-bound). The algorithm was tested using data from the Setun River basin (Moscow) collected during 2019–2023, including three source groups (surface soil, road dust, and river banks) and suspended sediment sampled at the river mouth as the target. In addition, weighting coefficients (W_{sum}) calculated using geometric and arithmetic mean particle diameters were found to be virtually identical ($r = 0.99$). R functions implementing the proposed correction algorithm have been made publicly available on GitHub.

Keywords: particle size, source apportionment, sorption-active elements, matrix-bound, suspended sediments, Setun River

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), project No. 25-17-00073.

REFERENCES

Chalov, S.R., Shinkareva, G.L., Trishin, A.Yu. Probe-trap for suspended sediment: Utility model patent No. 201927. Publication date: 21.01.2021. (In Russ.)

Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum. 1988. P. 567. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>

Collins A.L., Blackwell M., Boeckx P., Chivers C.A., Emelko M., Evrard O., Foster I., Gellis A., Gholami H., Granger S., Harris P., Horowitz A.J., Lacey J.P., Martinez-Carreras N., Minella J., Mol L., Nosrati K.,

Pulley S., Silins U., da Silva Y.J., Stone M., Tiecher T., Upadhyay H.R., Zhang Y. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes // Journal of Soils and Sediments. 2020. Vol. 20. P. 4160–4193.

<https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4>

Collins A.L., Walling D.E. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins // Journal of Hydrology. 2002. Vol. 261. P. 218–244.

[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00011-2)

Collins A.L., Walling D.E., Webb L., King P. Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information // Geoderma. 2010. Vol. 155. P. 249–261.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.008>

- Denisova I.S., Kobylchenko L.V., Girlo E.M., Chalov S.R. Spatial and temporal patterns of sediment yield formation in small rivers of the Moscow region (the Setun River basin) // *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2026. (in press). (In Russ.)
- Gaspar L., Blake W.H., Lizaga I., Latorre B., Navas A. Particle size effect on geochemical composition of experimental soil mixtures relevant for unmixing modelling // *Geomorphology*. 2022. Vol. 403. P. 108178. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108178>
- Girlo E.M., Chalov S.R., Kharchenko S.V. Assessment of suspended sediment inputs to rivers using sediment source fingerprinting for urbanized catchment management // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 6. P. 26–51. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-26-51> (In Russ.)
- Horowitz A.J. A primer on trace metal-sediment chemistry. 1985. P. 72. <https://doi.org/10.3133/wsp2277>
- Kharchenko S.V. sediment-gs-correction: R functions for particle size correction of chemical element concentrations. 2025. Available at: <https://github.com/sergeikharchenko/sediment-gs-correction> (accessed 9 June 2026). (In Russ.)
- Koiter A.J., Owens P.N., Petticrew E.L., Lobb D.A. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins // *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 125. P. 24–42. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.009>
- Lacey J.P., Evrard O., Smith H.G., Blake W.H., Olley J.M., Minella J.P.G., Owens P.N. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review // *Earth-Science Reviews*. 2017. Vol. 169. P. 85–103. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.009>
- Lamba J., Karthikeyan K.G., Thompson A.M. Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting // *Geoderma*. 2015. P. 239–240. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024>
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment // *Water Resources Management*. 2020. Vol. 34. P. 3879–3894. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0>
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. Consensus ranking as a method to identify non-conservative and dissenting tracers in fingerprinting studies // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 720. P. 137537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137537>
- Malhotra K., Lamba J., Srivastava P., Shepherd S. Fingerprinting Suspended Sediment Sources in an Urbanized Watershed // *Water*. 2018. Vol. 10. P. 1573. <https://doi.org/10.3390/w10111573>
- Motha J.A., Wallbrink P.A., Hairsine P.B., Grayson R.B. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia // *Water Resources Research*. 2003. Vol. 39. <https://doi.org/10.1029/2001WR000794>
- Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A.J., Lobb D.A., Petticrew E.L., Reiffarth D.G., Smith H.G., Woodward J.C. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications // *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 162. P. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>
- Perelman, A.I. (1989). *Geochemistry* [in Russian]. Moscow: Vysshaya Shkola. 528 p. (In Russ.)
- Smith H.G., Blake W.H. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections // *Geomorphology*. 2014. Vol. 204. P. 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.003>
- Walling D.E., Owens P.N., Leeks G.J.L. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK // *Hydrol. Process*. Vol. 13. 1999. P. 955–975. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199905\)13:7<955::AID-HYP784>3.0.CO;2-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<955::AID-HYP784>3.0.CO;2-G)
- Walling D.E., Owens P.N., Waterfall B.D., Leeks G.J.L., Wass P.D. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK // *Science of The Total Environment*. 2000. P. 251–252. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00384-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00384-3)

ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina M. Girlo, Ph.D. Student, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences; Junior Researcher, River Basins Hydrochemistry Group, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences; Junior Researcher, Laboratory of Natural Water Geochemistry, Lomonosov Moscow State University;

e-mail: kate.girlo.m@gmail.com

Sergey V. Kharchenko, Ph.D., Lead Researcher, Department of Geomorphology and Palaeogeography, Geography faculty, Lomonosov Moscow State University; Researcher, N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Geography faculty, Lomonosov Moscow State University; Senior Researcher, Laboratory of Geomorphology, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences;

e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

УДК 556.5

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ РУСЛОВОГО АЛЛЮВИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ГРЯД

В.И. Замышляев

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия
viza51@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2026

После доработки 18.05.2026

Принята к публикации 25.05.2026

Аннотация. В работе показывается, что не любые сочетания показателей крутизны и асимметричности речных донных гряд обеспечивают их морфологическую устойчивость. На основе сравнения «треугольной» аппроксимации, описывающей профиль гряды треугольником, и аппроксимации профиля гряды «синусоидальной» моделью, построенной путем «склейки» двух ветвей модифицированной синусоиды, проанализировано влияние выбора метода аппроксимации на области допустимых соотношений параметров крутизны и асимметричности гряды. Установлено, что требование непрерывности первой производной (гладкости профиля) в точках подвалов и гребня, реализуемое в «синусоидальной» модели, накладывает более жесткие ограничения на геометрию гряды. Показано, что максимальный локальный уклон тылового откоса синусоидального профиля существенно превышает средний уклон соответствующей треугольной модели. Исходя из условия, что угол наклона поверхности гряды не должен превышать угла естественного откоса материала, из которого сложена гряда, автор получил аналитические зависимости для определения критической крутизны и критической асимметрии для «треугольных» и «синусоидальных» гряд. Построены совмещенные номограммы областей устойчивости, позволяющие идентифицировать зоны физически невозможных комбинаций параметров для различных типов донных отложений. Результаты работы могут быть использованы для верификации данных батиметрических съемок и уточнения расчетов гидравлического сопротивления русла.

Ключевые слова: речные гряды, продольный профиль, треугольная аппроксимация, синусоидальная аппроксимация, устойчивость склона, угол естественного откоса, крутизна гряды, асимметрия гряды

DOI: 10.71367/3034-4638-2026-2-2-41-52

ВВЕДЕНИЕ

Геометрия донных гряд речного русла оказывает большое влияние на многие факторы, определяющие режим руслового потока и характер русловых деформаций. Хотя в последнее время появились новые методы получения и обработки рельефов дна речного русла, позволяющие получать трехмерные цифровые описания топографии поверхности русла (Gutierrez et al., 2013; Nuñez-Gonzalez et al., 2014; Самсонов, 2016; Ferguson et al., 2022; Либина, 2022; van Denderen et al., 2024), все же обработка батиграмм, получаемых путем эхолотирования речного русла, по-прежнему имеет большое практическое значение (Сидорчук, 2015; Leary, Buscombe, 2020; Schippa, Cavalieri, 2021). Традиционные методы обработки таких батиграмм предполагают идентификацию гряд, определение их геометрических параметров (чаще всего — длины и высоты),

определение скорости движения гряд и т. д. Нередко при исследованиях донных гряд вместо абсолютных значений параметров, интересующих исследователей, применяются безразмерные характеристики, позволяющие устранять влияние масштаба на закономерности исследуемых процессов.

Чаще всего задачи, связанные с исследованиями грядового движения наносов, ставятся в двухмерной постановке (Simons et al., 1965; Abraham et al., 2011; Leary, Buscombe, 2020; Костюченко, Заварзин, 2023), при которой типичное вертикальное продольное сечение гряды представляется в виде, показанном на рис. 1 (движение потока и гряды на рисунке слева направо). Ввиду существования некоторой неоднозначности в определении параметров, характеризующих геометрию речных донных форм, есть смысл уточнить или ввести те определения, которые будут использоваться в настоящей работе.

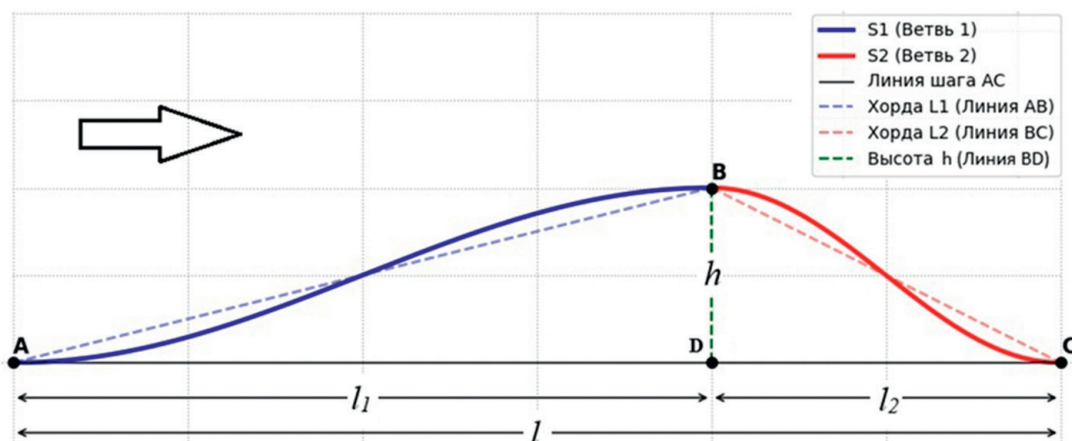


Рис. 1. Схематизированная донная гряда (движение потока и гряды слева направо)

Fig. 1. Schematic representation of a riverbed dune (flow and dune movement from left to right)

Начало и конец гряды на рис. 1 обозначены точками **A** и **C**, соответствующими (в плоской постановке) верховому и низовому подвальям. Расстояние между этими точками будем называть длиной гряды и обозначать через l . Отрезок прямой **AC**, соединяющий эти точки, будем называть шагом гряды, а точку **B**, наиболее удаленную от линии шага, — вершиной (гребнем) гряды. Проекция гребня на горизонталь обозначена точкой **D**, а отрезок, соединяющий точки **B** и **D**, будем называть высотой гряды и обозначать через h . Криволинейный отрезок **AB** есть напорный (верховой) склон гряды (его длину будем обозначать через S_1), а **BC** — тыловой (низовой) откос гряды (его длина — S_2). Прямолинейные отрезки, соединяющие эти же точки, будем называть хордами и их длины обозначать как L_1 и L_2 , а отрезки **AD** и **DC** — напорным и тыловым плечом гряды; их длины обозначим через l_1 и l_2 соответственно. Очевидно, что

$$l = l_1 + l_2 \quad (1)$$

Для характеристики геометрии речных гряд чаще всего используют их длину l и высоту h , а основными безразмерными параметрами, выражающими их геометрические свойства, являются показатели крутизны (или сплюснутости) гряд и их асимметричности. Традиционно показателем крутизны гряд, который обозначим через σ , является отношение высоты гряды к ее длине, т. е.

$$\sigma = h/l \quad (2)$$

Исследованиями значений крутизны гряд занимались разные ученые, которые в своих работах указывают достаточно сильно отличающиеся значения этого показателя. Например, в работе (Знаменская, 1968; с. 164) указан диапазон h/l от 0.005 до 0.08–0.2, в монографии (Барышников,

2007; с. 123) указаны значения от 0.08 до 0.5, в работе (Shinohara, 1959) — от 0.02 до 0.1; в работе (Swart, 1976) — от 0.05 до 0.2; в монографии (Van Rijn, 1984) — от 0.01 до 0.2. Ни в каких из известных нам публикаций не было указаний на то, что показатель крутизны гряд превышал значения 0.5. В то же время некоторые авторы указывали в качестве нижней границы крайне малые значения этого параметра, вплоть до значения 0.005. На наш взгляд, значение крутизны гряд, равное 0.01, а тем более 0.005, свидетельствует скорее о неверной интерпретации случайных отклонений на батиграммах, чем о существовании столь пологих донных форм.

Важность использования параметра, характеризующего асимметрию гряды, была обоснована в работе (Замышляев, 2024), и там же было предложено несколько параметров, пригодных для этой цели. Можно выделить два подхода к определению показателя асимметричности гряды: первый основывается на соотношении углов, образуемых с линией горизонта напорным и тыловым склонами гряды, второй — на соотношении показателей длины плеч этих склонов. Применение углов для выражения асимметричности гряды имеет тот недостаток, что при аппроксимации формы гряды гладкими функциями, предполагающими плавное обтекание гряды потоком и исключающими разрывы производных этих функций, как, например, в случае описанной ниже аппроксимации ветвями синусоиды, в точках подвалей **A** и **C** склоны гряды образуют нулевой угол с горизонтом, и поэтому данный подход неприменим. Более универсальным представляется подход, который связывает асимметрию гряды с положением точки проекции ее гребня на линии шага. Реализуя

Таблица 1. Значения угла естественного откоса ϕ для некоторых материалов речного аллювия и максимально возможных значений крутизны для треугольных и синусоидальных гряд**Table 1.** Values of the angle of repose ϕ for some river alluvium materials and the maximum possible steepness values for triangular and sinusoidal dunes

Материал	Ил / Глина	Песок мелкий	Песок средний	Гравий	Галька
ϕ	15–25	26–30	30–34	35–40	40–42
σ_{tri}^*	0.13–0.23	0.24–0.29	0.29–0.34	0.35–0.42	0.42–0.45
σ_{sin}^*	0.09–0.15	0.16–0.18	0.18–0.21	0.22–0.27	0.27–0.29

этот подход, будем называть коэффициентом асимметричности гряды величину

$$a = l_1/l \quad (3)$$

Профиль типичной речной гряды характеризуется тем, что длина ее напорного склона, по крайней мере, не меньше длины ее тылового откоса, а потому справедливо соотношение:

$$0.5 \leq a < 1 \quad (4)$$

Изучению асимметрии гряд, насколько нам известно, было посвящено гораздо меньше исследований, чем изучению крутизны, а потому найти работы, в которых были бы показаны диапазоны значений соответствующих показателей, нам не удалось. А между тем форма речных гряд, определяемая значениями крутизны и асимметричности, оказывает несомненное влияние на многие важнейшие характеристики системы поток–русло, такие как, например, гидравлическое сопротивление речного русла.

Настоящая работа посвящена определению допустимых пределов изменения величин a и σ , а также установлению областей значений этих параметров в условиях ограничений, накладываемых свойствами материала, из которого состоит донная гряда, а именно его сыпучестью, выражаемой значением угла естественного откоса.

АНАЛИЗ

Хотя данных по предельным верхним значениям коэффициента асимметричности в литературе, по-видимому, нет, тем не менее очевидно, что абсолютно лимитирующим можно считать значение $a = 1$, при превышении которого у гряды должен был бы появляться «kozyrek», что, по крайней мере, для несвязных грунтов невозможно. Столь же очевидно, что и показатель крутизны гряды также имеет физические ограничения. Действительно, допустить существование сложенной из несвязанного материала гряды, у которой показатель крутизны имел бы значение, скажем, $\sigma = 2$, т. е. гряды, у ко-

торой высота была бы в 2 раза больше ее длины, невозможно. И связано это не только с тем, что крайне сложно представить гидродинамические характеристики потока, способного формировать донные формы с подобной геометрией, но и с тем обстоятельством, что для несвязных материалов существует лимитирующий фактор — угол естественного откоса, определяемый как угол между свободной поверхностью сыпучего вещества и горизонтальной плоскостью, при котором грунт сохраняет предельное равновесие. Другими словами, это есть предельный угол, при превышении которого происходит обрушение материала. Соответственно, значение угла, образуемого с горизонталью склоном гряды с указанной крутизной $\sigma = 2$, будет не менее 76° ¹, что существенно превышает значения угла естественного откоса ϕ для любого речного аллювия (значения ϕ для некоторых русловых материалов приведены в таблице 1).

Таким образом, даже этот простейший пример показывает, что хотя математически показатели σ и a являются независимыми величинами, однако на формирование геометрии гряды влияют различные физические ограничения, накладываемые потоком, руслом и материалом, из которого сложено русло. Эти ограничения определяют не просто области значений указанных параметров — σ и a , т. е. значения, за пределы которых они выходить не могут, но и их допустимые комбинации.

Предельные значения коэффициента асимметричности «треугольной» гряды при заданной крутизне, так же как предельные значения крутизны при заданной асимметричности гряды, будут определяться величиной угла α_{tri} , образуемого профилем гряды с горизонтом. Для «треугольной» гряды этот угол равен углу, который хорда L_2 образует с осью x ; этот угол постоянен вдоль всего склона и определяется из тригонометрических соотношений:

$$\alpha_{\text{tri}} = \arctan(h/l_2) \quad (5)$$

Используя равенства (1) – (3), путем несложных преобразований получим:

¹ Угол между тыловым склоном гряды и горизонтом при рассматриваемой крутизне $\sigma = 2$ может быть равен 76° только для симметричных гряд, т. е. при $a = 0.5$; для несимметричной гряды этот угол будет еще больше, возрастая с ростом коэффициента асимметрии.

$$\frac{h}{l_2} = \frac{h}{l - l_1} = \frac{h}{l(1 - l_1/l)} = \frac{\sigma}{1 - a}, \quad (6)$$

и тогда выражение (5) принимает вид:

$$\alpha_{tri} = \arctan(\sigma/(1 - a)) \quad (7)$$

Этот угол, постоянный для «треугольной» гряды вдоль всего тылового откоса, не может превышать угла естественного откоса ϕ для того конкретного материала, из которого сложена гряда, т. е. должно выполняться условие:

$$\alpha_{tri} = \arctan(\sigma/(1 - a)) \leq \phi \quad (8)$$

или

$$\frac{\sigma}{1 - a} \leq \tan \phi \quad (9)$$

Это выражение связывает возможные значения σ и a при заданных ϕ .

Как уже было отмечено, максимально возможное значение будет достигаться при симметричном профиле гряды, когда $a = 0.5$. Соответственно максимальное возможное значение для «треугольной» гряды определяется выражением:

$$\sigma_{tri}^* = (\tan \phi)/2, \quad (10)$$

где σ_{tri}^* есть максимальное возможное значение показателя σ_{tri} .

Неравенство (9) позволяет при заданном значении угла естественного откоса ϕ выразить предельное (критическое) значение крутизны σ_{crit} для «треугольной» гряды в функции от коэффициента асимметрии a :

$$\sigma_{crit} = (1 - a) \tan \phi, \quad (11)$$

и наоборот — предельное значение коэффициента асимметрии a_{crit} в зависимости от крутизны гряды σ :

$$a_{crit} = 1 - \sigma/\tan \phi \quad (12)$$

Ввиду соотношения (10) минимальное значение a_{crit} равно 0.5. Вместе с тем при любом значении угла ϕ величина a_{crit} может быть сколь угодно близкой к 1 в том случае, если крутизна σ достаточно мала и если при этом не нарушается условие (12): т. е. $a_{crit} \rightarrow 1$, если $\sigma \rightarrow 0$. Таким образом, для максимального значения коэффициента асимметрии a нет ограничений, аналогичных соотношению (10). Семейства параметрических графиков, выражающих последние две зависимости, приведены на рис. 2 и 3. Пересечение наклонных линий с осью $a = 0.5$ дает максимальные значения величины, выраженные соотношением (10).

До сих пор мы рассматривали поведение критического угла, образуемого прямыми линиями, рассматриваемыми как аппроксимация формы продольного сечения гряды («треугольная» гряда), но если аппроксимировать форму гряды другими фигурами, то вид функции, используемой при такой аппроксимации, будет оказывать влияние на соотношение предельно допустимых показателей крутизны и асимметрии. Разберем это обстоятельство более подробно.

В работе автора (Замышляев, 2026) был предложен подход, при котором форма продольного профиля гряды описывалась двумя ветвями синусоиды: $Z = Z_1(x)$ на участке напорного склона гряды ($x \in [0, l_1]$) и $Z = Z_2(x)$ на участке ее тылового откоса

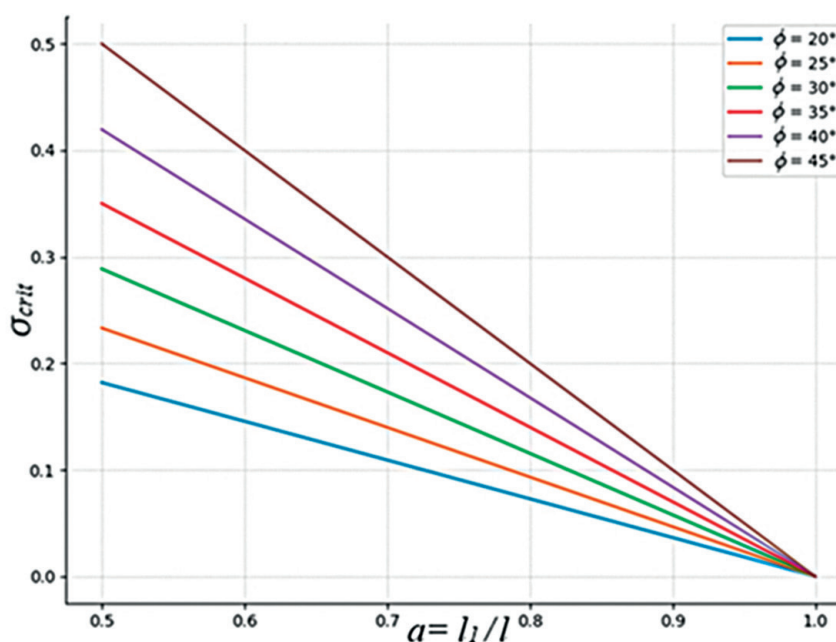


Рис. 2. Зависимость предельных значений крутизны σ_{crit} от коэффициента асимметрии a для «треугольной» гряды при различных значениях параметра ϕ

Fig. 2. Dependence of critical steepness values σ_{crit} on the asymmetry coefficient a for a “triangular” dune at various values of parameter ϕ

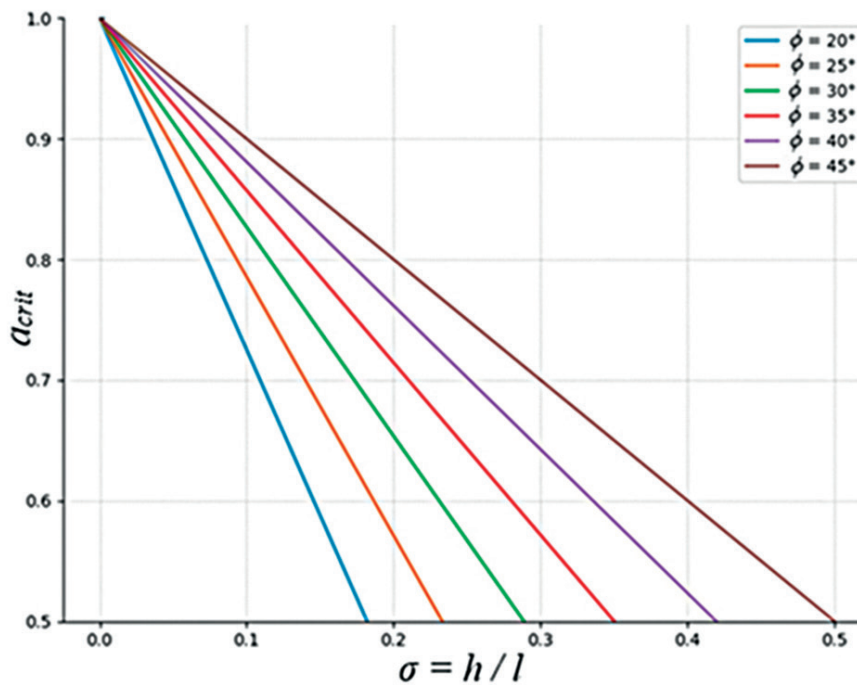


Рис. 3. Зависимость предельных значений коэффициента асимметрии a_{crit} от крутизны σ для «треугольной» гряды при различных значениях параметра ϕ

Fig. 3. Dependence of critical asymmetry coefficient values a_{crit} on steepness σ for a “triangular” dune at various values of parameter ϕ

($x \in [l_1, l]$). Эти ветви имели равные амплитуду и вертикальный сдвиг, но разные периоды и фазовые сдвиги, так что описывающие их функции имеют следующий вид:

$$Z_1(x) = \frac{h}{2} (1 - \cos \frac{\pi x}{l_1}) \quad (13)$$

$$Z_2(x) = \frac{h}{2} (1 + \cos \frac{\pi(x - l_1)}{l_2}) \quad (14)$$

Легко убедиться, что для этих функций выполняются равенства:

$$\begin{aligned} Z_1(0) = 0; Z_1(l_1) = h, \\ Z_2(l_1) = h; Z_2(l_1 + l_2) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Показанная на рис. 1 гряда построена с помощью именно таких функций, для которых были использованы значения $\sigma = h/l = 1/6$ и $a = l_1/l = 2/3$. Синусоидальная модель, в отличие от треугольной, исключает разрывы производных в характерных точках профиля. Такая гладкость профиля обеспечивает более корректное описание взаимодействия потока с донной формой, что может рассматриваться как преимущество подобных моделей при их использовании в теоретических построениях.

Вместо двух кусочных функций можно построить единую функцию $Z(x)$, описывающую поведение отметки поверхности гряды на участке всего шага гряды, т. е. на интервале $x \in [0, l]$ — ее выражение приведено в работе автора (Замышляев, 2026), — но для нас сейчас важно исследовать максимальный

угол, который имеет тыловой откос гряды при его описании функцией (14). Как известно, тангенс угла наклона касательной к любой непрерывной функции равен производной этой функции. Производная для синусоидальной функции (14) равна

$$Z'_2(x) = -\frac{\pi h}{2l_2} \sin \left(\frac{\pi(x - l_1)}{l_2} \right) \quad (16)$$

Эта производная достигает максимального по модулю значения в середине интервала тылового склона, т. е. при $x = l_1 + l_2/2$, следовательно:

$$|Z'_2(x)|_{\max} = \frac{h\pi}{2l_2} = \frac{h\pi}{2(l - l_1)} = \frac{h\pi}{2l(1 - a)} = \frac{\sigma\pi}{2(1 - a)} \quad (17)$$

Тогда максимальный угол $\alpha_{\sin}$, образуемый с горизонтом касательной к тыловой ветви гряды, определяется равенством:

$$\alpha_{\sin} = \arctan \left(\frac{\sigma\pi}{2(1 - a)} \right) \quad (18)$$

Формулы для «синусоидальной» модели, аналогичные формулам (8) – (10) для «треугольной» модели, будут иметь вид:

$$\alpha_{\sin} = \arctan \left(\frac{\sigma\pi}{2(1 - a)} \right) \leq \phi, \quad (19)$$

$$\frac{\sigma\pi}{2(1 - a)} \leq \tan \phi, \quad (20)$$

$$\sigma_{\sin}^* = (\tan \phi) / \pi, \quad (21)$$

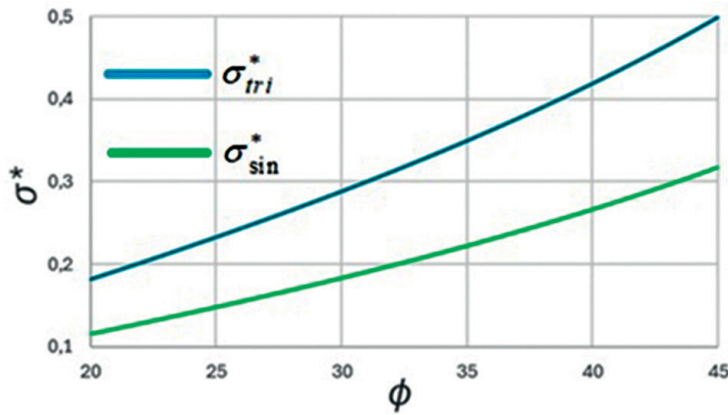


Рис. 4. График зависимостей максимальных значений крутизны σ_{tri}^* и σ_{sin}^* от угла естественного откоса ϕ для симметричных ($a = 0.5$) «треугольных» и «синусоидальных» гряд

Fig. 4. Graphs of dependencies of maximum steepness values σ_{tri}^* and σ_{sin}^* on the angle of repose ϕ for symmetric ($a = 0.5$) “triangular” and “sinusoidal” dunes

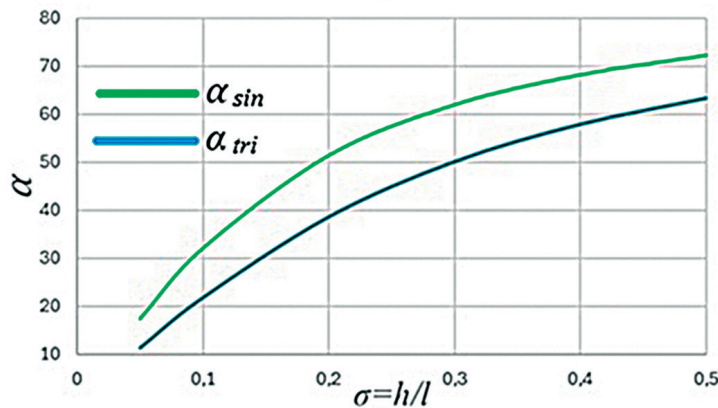


Рис. 5. Сравнение максимальных углов на тыловом склоне для «синусоидальной» и «треугольной» гряды при $a = 0.75$ и различных значениях $\sigma = h/l$

Fig. 5. Comparison of maximum angles on the back slope for “sinusoidal” and “triangular” dunes at $a = 0.75$ and various values of $\sigma = h/l$

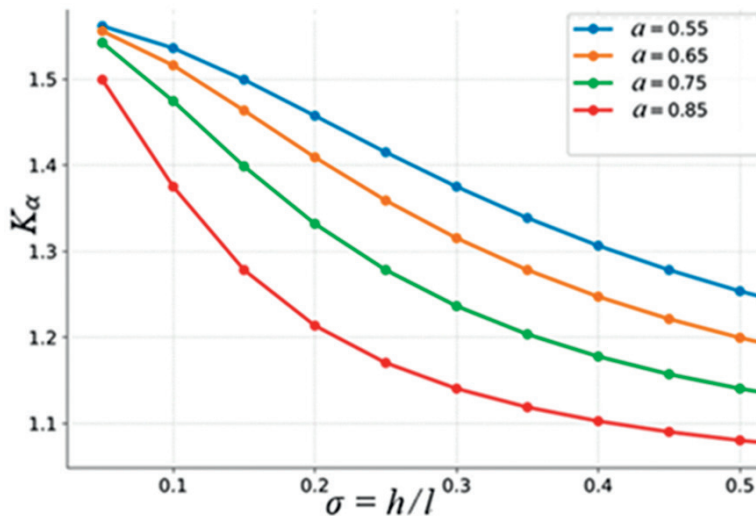


Рис. 6. Параметрические графики зависимости коэффициента K_α от $\sigma = h/l$ при различных значениях параметра a

Fig. 6. Parametric graphs of the dependence of coefficient K_α on $\sigma = h/l$ at various values of parameter a

где σ_{sin}^* есть максимальное возможное значение показателя σ_{sin} , достигаемое при $a = 0.5$. Значения σ_{tri}^* и σ_{sin}^* для угла естественного откоса ϕ в диапазоне от 20 до 45° приведены в таблице 1, а их связь с углом ϕ показана на рис. 4.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнивая поведение графиков зависимостей (7) и (18), показанных на рис. 5, можно видеть, что для «синусоидальной» гряды при всех значениях σ и a угол наклона касательной α_{sin} превышает зна-

чение угла α_{tri} , соответствующего «треугольной» гряде (коэффициент асимметрии a для этих графиков взят равным 0.75).

Если ввести коэффициент, характеризующий соотношение указанных углов для «синусоидальной» и «треугольной» гряд,

$$K_\alpha = \alpha_{sin} / \alpha_{tri}, \quad (22)$$

можно построить показанный на рис. 6 график зависимости этого коэффициента от крутизны при различных значениях показателя асимметрии.

Из этого графика видно, что наибольшая разность между углами «синусоидальной» и «треугольной» гряд наблюдается при малых значениях крутизны; при более крутых грядах разница между ними будет уменьшаться, оставаясь, тем не менее, существенной. Таким образом, «синусоидальная» модель гряды накладывает более строгие условия устойчивости склона: там, где треугольник «проходит» по углу откоса, синусоида может показывать превышение критического значения. Синусоидальная модель более чувствительна к устойчивости грунта — она «запрещает» существование слишком крутых форм, которые в треугольной модели рассматривались бы как устойчивые.

Из выражений (10) и (21) можно получить формулу для соотношения максимальных допустимых значений крутизны для «треугольных» и «синусоидальных» гряд, а из (7) и (18) — формулу для соотношения максимальных углов для таких гряд:

$$\frac{\sigma_{tri}^*}{\sigma_{sin}^*} = \frac{\tan(\alpha_{sin})}{\tan(\alpha_{tri})} = \frac{\pi}{2} \approx 1.57 \quad (23)$$

Из этого равенства следует, что максимально допустимое значение крутизны для «треугольных» гряд в 1.57 раза больше соответствующего значения для «синусоидальных» гряд.

На рис. 7 приведены параметрические графики для угла α_{sin} , выражаемого формулой (18). Можно видеть, что с увеличением значений показателей асимметрии a и крутизны σ максимальный угол наклона α_{sin} растет очень быстро. Например, при $\sigma = 0.3$ и $a = 0.65$ значение α_{sin} составляет примерно 55° , что значительно выше порогового значения угла естественного откоса ϕ , взятого в данном примере равным 30° (указан на графике пунктирной красной линией).

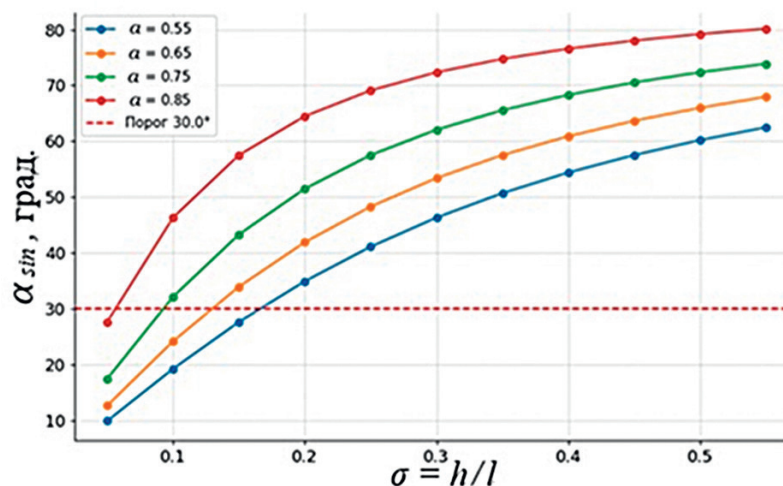


Рис. 7. Параметрические графики зависимости угла α_{sin} от $\sigma = h/l$ при различных значениях параметра a («синусоидальная» модель)

Fig. 7. Parametric graphs of the dependence of angle α_{sin} on $\sigma = h/l$ at various values of parameter a ("sinusoidal" model)

Формально для описания формы гряды «треугольной» или «синусоидальной» моделями можно использовать любые пары значений, характеризующих крутизну и симметричность гряд. Однако некоторые дополнительные факторы могут накладывать существенные ограничения на набор комбинации этих параметров. Угол естественного откоса материала, из которого сложена гряда, является одним из таких факторов. Типичные максимальные значения этого параметра для речного песка обычно не превышают 30° . Таким образом, для гряд, чье продольное сечение аппроксимируется синусоидальной моделью, те сочетания значений крутизны и асимметрии гряды, которые на рис. 7 лежат выше красной пунктирной линии, физически не реализуемы, поскольку при таких комбинациях этих параметров тыловой склон гряды будет разрушаться. Крутизна таких гряд не будет превышать значений $\sigma \approx 0.2$, а для гряд, чья форма ближе к треугольной модели, крутизна, как показывает соотношение (23), может принимать значения до $\sigma \approx 0.3$.

Для «синусоидальных» гряд можно выписать выражения для предельных (критических) значений показателя крутизны $\tilde{\sigma}_{crit}$ и коэффициента асимметрии $\tilde{a}_{crit}$, аналогичные выражениям (11) и (12) для «треугольных» гряд:

$$\tilde{\sigma}_{crit} = \frac{2 \tan(\phi)}{\pi} (1 - a), \quad (24)$$

$$\tilde{a}_{crit} = 1 - \frac{\pi}{2 \tan(\phi)} \sigma \quad (25)$$

Минимальное значение коэффициента асимметрии для «синусоидальной» гряды $\tilde{a}_{crit}$, как и значение a_{crit} для «треугольной» гряды, равно 0.5, но одновременно его величина может быть сколь угодно близкой к 1 при любом значении угла ϕ .

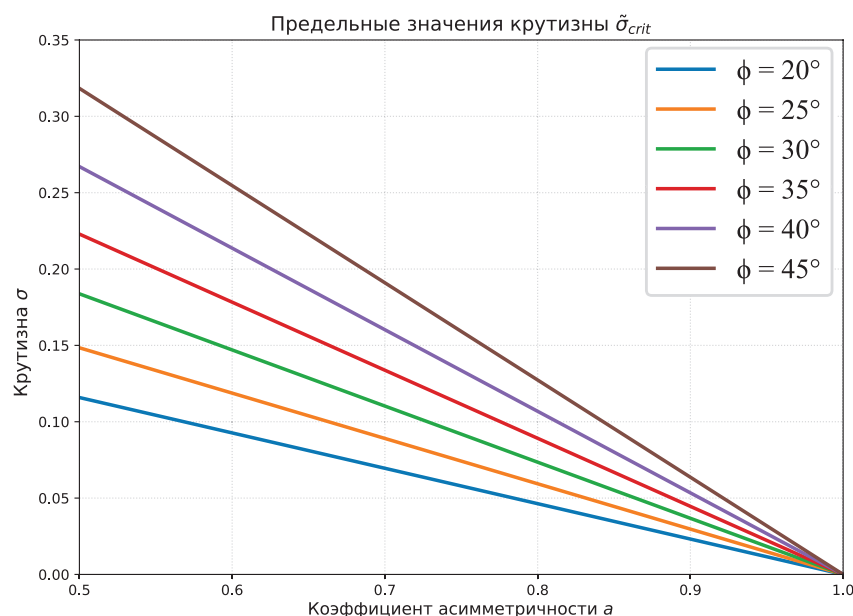


Рис. 8. Предельные значения крутизны $\tilde{\sigma}_{crit}$ в функции от коэффициента асимметрии a при различных значениях параметра ϕ для «синусоидальной» гряды

Fig. 8. Critical steepness values $\tilde{\sigma}_{crit}$ as a function of the asymmetry coefficient a at various values of parameter ϕ for a “sinusoidal” dune

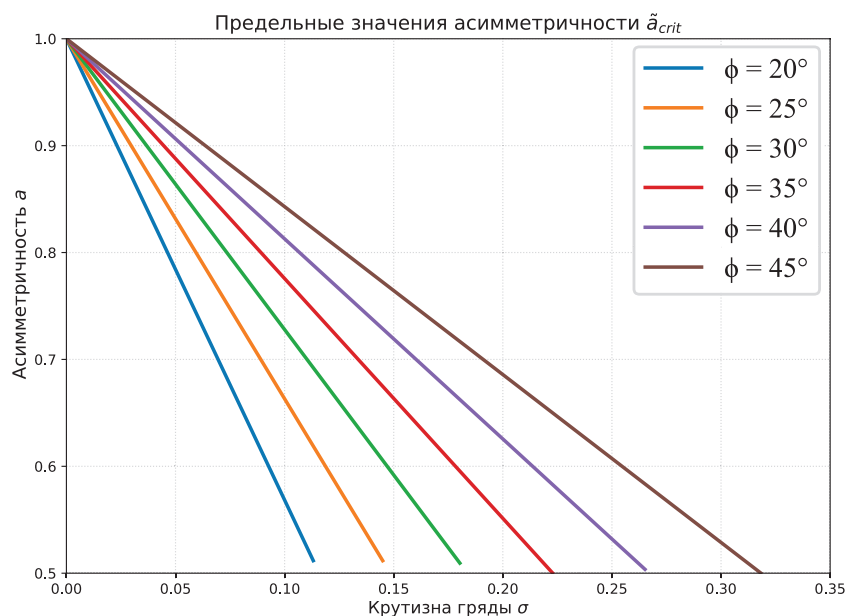


Рис. 9. Предельные значения коэффициента асимметрии $\tilde{a}_{crit}$ в функции от крутизны σ при различных значениях параметра ϕ для «синусоидальной» гряды

Fig. 9. Critical asymmetry coefficient values $\tilde{a}_{crit}$ as a function of steepness σ at various values of parameter ϕ for a “sinusoidal” dune

На рис. 8 и 9 представлены графики последних двух зависимостей для «синусоидальных» гряд, аналогичные графикам на рис. 3 и 4 для «треугольных» гряд. График на рис. 8, отражающий соотношение (21), показывает, что для гряд с заданным значением a допустимыми будут лишь те значения σ , которые лежат ниже прямой, соответствующей величине ϕ для того типа донного материала, из которого сложена гряда: при подобранных таким образом соотношениях a и σ у гряды не будет поверхностей, углы наклона которых превышают угол естественного откоса. Аналогичным образом график на рис. 9, отражающий соотношение (22), показывает, что для гряд с заданным значением σ допустимыми будут

лишь те значения a , которые лежат ниже прямой, соответствующей величине ϕ для конкретного донного материала.

Для удобства на рис. 10 представлены совмещенные графики, на которых показаны области устойчивости для «треугольных» и «синусоидальной» гряд, сложенных из песка ($\phi = 30^\circ$). Области, закрашенные зеленым, можно считать зонами абсолютной устойчивости, при попадании в которую значений a и σ угол наклона поверхности гряды везде меньше угла естественного откоса. При попадании этих пар значений в желтую зону гряда будет устойчива, если ее очертания ближе к «треугольной» гряде, но неустойчива, если ее профиль ближе к «синусоидальной» гряде.

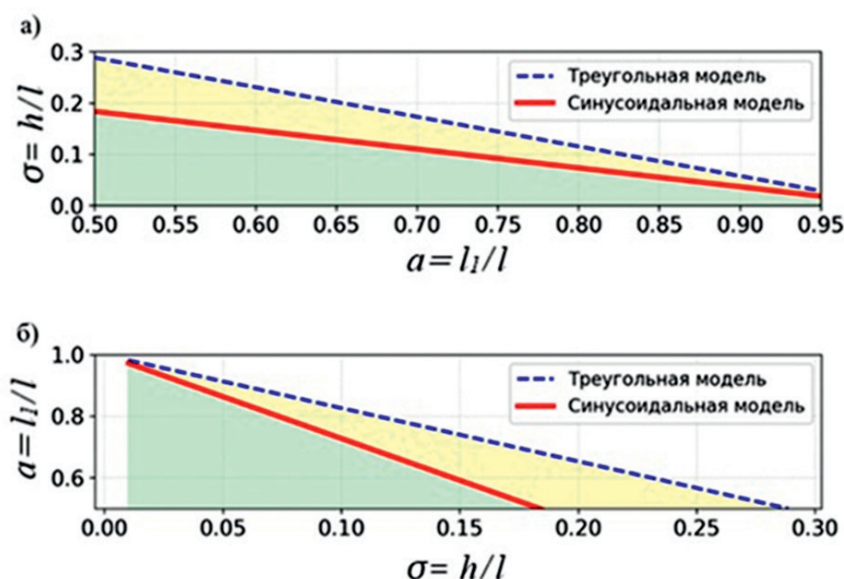


Рис. 10. а) Значения σ , обеспечивающие устойчивость гряды при заданном a . б) Значения a , обеспечивающие устойчивость гряды при заданном σ

Fig. 10. (a) Values of σ ensuring dune stability at a given a . (б) Values of a ensuring dune stability at a given σ

Допустимыми комбинациями значений крутизны и асимметрии гряды являются значения, лежащие в цветных зонах: под красной линией для «синусоидальной» гряды и под синей — для «треугольной» гряды. Например, из первой диаграммы можно увидеть, что если $a = 0.6$, то максимальное значение крутизны для «синусоидальной» гряды $\sigma = 0.147$ (для «треугольной» гряды $\sigma = 0.23$) — при больших значениях этого коэффициента угол, образуемый профилем гряды, был бы больше угла естественного откоса. Из второй диаграммы можно увидеть, что если $\sigma = 0.1$, то максимально возможное значение a , определяемое ограничением, накладываемым углом естественного откоса, составит 0.729 для «синусоидальной» гряды и 0.827 — для «треугольной» гряды. Желтая зона на диаграммах демонстрирует, что параметры гряды a и σ из этой зоны являются допустимыми при использовании треугольной модели, однако если более адекватным является описание профиля гряды синусоидальной моделью, то значения из этой области приведут к обрушениям тела гряды из-за превышения угла ϕ в локальных точках на тыловом откосе. В этом смысле желтая зона «завышенной устойчивости» на диаграммах должна рассматриваться как пограничная зона, параметры из которой могут соответствовать как устойчивым, так и неустойчивым донным формам.

В работе М.С. Ялина (Yalin, 1972) приведено теоретическое обоснование предела крутизны гряд, основанное на изучении гидродинамической картины отрыва потока за гребнем гряды. Согласно его исследованиям, максимальная крутизна песчаных гряд в потоке составляет примерно 0.05–0.06, после чего начинается размыв гребня,

т. е. это значение соответствует динамическому равновесию, при котором энергия турбулентного вихря препятствует дальнейшему увеличению высоты, а увеличение сдвига потока приводит к уменьшению крутизны по мере перехода русла к плоскому состоянию. Этот результат Ялин получил в процессе исследования сопротивления формы русла и установления связи между длиной донной формы и глубиной потока. Геометрия донных гряд, однако, определяется не только гидродинамическими свойствами потока, но и характеристиками материала, из которого состоит гряда, в частности его сыпучестью. Результаты настоящей работы показывают, что указанное в работе Ялина значение крутизны песчаных гряд в действительности не является максимальным: при определенных значениях угла естественного откоса и коэффициента асимметричности гряды она может иметь большие значения, определяемые выражениями (9) и (20), что подтверждается приведенными выше данными натурных наблюдений. Максимальные значения крутизны гряд приведены в таблице 1. При проведении своего анализа Ялин использовал треугольные двумерные формы, но не указал, каковы были показатели асимметрии этих донных форм. С помощью выведенной в настоящей работе связи между крутизной и асимметрией гряды можно оценить степень асимметричности песчаных гряд, которыми оперировал в своем исследовании Ялин. Приняв значение угла естественного откоса $\phi = 30^\circ$, характерное для песка, из формул (12) и (25) получаем, что значение $\sigma = 0.06$ соответствует показателю асимметрии $a = 0.89$ для «треугольных» гряд и величине $a = 0.84$ — для синусоидальных гряд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовано влияние угла естественного откоса материала, из которого сложена донная гряд, на диапазоны допустимых значений коэффициента асимметрии гряды a и ее крутизны σ и связь критических значений этих параметров между собой в зависимости от угла естественного откоса ϕ . Также показано, как выбранная модель аппроксимации формы поперечного сечения донных гряд — треугольная или синусоидальная — влияет на характер связи между исследуемыми геометрическими характеристиками гряды. В результате проведенного анализа получены следующие результаты:

1. Геометрические ограничения. Установлено, что хотя в математическом смысле показатели предельных значений крутизны σ и асимметрии a гряды являются независимыми величинами, но физические свойства донного материала (угол естественного откоса ϕ) определяют границы области допустимых значений указанных параметров.

2. Связь между значениями показателей крутизны и асимметричности для устойчивых гряд. Установлены зависимости (9) и (20), связывающие предельные значения показателей крутизны и асимметричности гряд для значений углов откоса ϕ , определяемых свойствами материала, слагающего гряд.

3. Критический порог устойчивости. Анализ показал, что синусоидальная модель является более «консервативной». Максимальный угол наклона тылового откоса в ней достигается локально (в середине склона) и оказывается значительно выше среднего угла наклона хорды в треугольной модели. Это приводит к тому, что область устойчивых состояний для синусоидальных гряд на 30–40% уже, чем для треугольных.

4. Практический инструмент. Построенные параметрические графики и совмещенные диаграммы областей устойчивости позволяют быстро оценивать реалистичность донных форм. Зоны «завышенной устойчивости», выявленные при сравнении моделей, могут указывать на потенциальные ошибки упрощенных геометрических методов при анализе крутых и сильно асимметричных гряд, а потому следует проявлять осторожность при интерпретации данных батиметрических съемок, особенно в диапазонах параметров, близких к предельным.

5. Перспективы. Разработанный аппарат для 2D-профиля служит математическим фундаментом для перехода к 3D-моделированию пространственных донных форм (дюн), где учет критических углов

наклона станет еще более значимым фактором формирования рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков / Н.Б. Барышников. — СПб.: изд. РГГМУ, 2007. — 314 с.

Замышляев В.И. Соотношения между параметрами донных гряд при аппроксимации их продольного сечения треугольником / В.И. Замышляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 236–250.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250

Замышляев В.И. Аппроксимация продольного профиля донных гряд ветвями синусоиды — 2026 (в печати)

Знаменская Н.С. Грядовое движение наносов. Теория и практические приложения / Н.С. Знаменская. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968. — 188 с.

Костюченко А.А. Метод выполнения и обработки измерений для определения параметров донных гряд / А.А. Костюченко, Р.В. Заварзин // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: Сб. науч. тр. Вып. 6. Ч. 1 — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2023. — 151–165 с.

Либина Н.В. Методы обработки и анализа цифровых моделей рельефа дна. Океанология, 2022, том 62, № 2, с. 324–333.

DOI: 10.31857/S0030157422020125

Самсонов Т.Е. Картографические методы визуализации и генерализации цифровых моделей рельефа / Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. Вып. 6. М., 2016. С. 9–18.

Сидорчук А. Оценка стока влекомых наносов в речном русле с учетом данных об активной и пассивной динамике гряд // Водные ресурсы. — 2015. — Т. 42, № 1. — С. 31–44.

DOI: 10.7868/S0321059615010137

Abraham D., Kuhnle R., and Odgaard J.A. Validation of Bed-Load Transport Measurements with Time-Sequenced Bathymetric Data. J. Hydraul. Eng. 2011.137:723–728.

DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000357.

Ferguson, R., Lewin, J., and Hardy, R. (2022). Fluvial processes and landforms. Geological Society, London, Memoirs. 58. M58-2021. 10.1144/M58-2021-18.

Gutierrez, R. R., Abad, J. D., Parsons, D. R., and Best, J. L. (2013). Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms:

Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Ro Parana, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3):1400-1418.

Leary K.C.P. Estimating sand bed load in rivers by tracking dunes: a comparison of methods based on bed elevation time series / K.C.P. Leary, D. Buscombe // *Earth Surface Dynamics*. — 2020. — Vol. 8. — 13 p.

Nuñez-Gonzalez, F., Hesse, D., Ettmer, B., Kume, E., and Link, O. (2014). Objective method for ranking bedforms with a 3-dimensionality-index, in: *River Flow 2014*, p. 1059-1065.

Shinohara K. On the Characteristics of Sand Waves Formed upon Beds of the Open Channels and Rivers / K. Shinohara, T. Tsubaki // *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*. — 1959. — Vol. VII. — No. 25. — P. 15–45.

Schippa, L. and Cavalieri, I. (2021). Semiautomatic algorithm for the interpretation of the bedforms and statistical analysis. 169-179.

DOI: 10.2495/WRM210151

Simons, D., Richardson, E., and Nordin, C., 1965. Bedload equation for ripples and dunes: U.S. Geological Survey Professional Paper 462, p. H1-H9,

DOI: 10.3133/pp462H

Swart D. H. Predictive equations regarding coastal transports / D. H. Swart // *Proceedings of the Fif-*

teenth Conference on Coastal Engineering. — American Society of Civil Engineers, 1976. — Vol. II. — P. 1113–1132. DOI: 10.1061/9780872620834.066.

Van Denderen, R. P., Schielen, R. M. J., Paarlberg, A. J., Reneerkens, M., and Augustijn, D. C. M. (2024). Analyzing natural bed-level dynamics to mitigate the morphological impact of river interventions. *River Research and Applications*, 40(5), 735–746.

DOI: 10.1002/rra.4270

Van Rijn L. C. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness / L. C. Van Rijn // *Journal of hydraulic engineering*. — 1984. — Vol. 110. No. 12. P. 1733–1754. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).

Yalin M.S. *Mechanics of Sediment Transport*. Pergamon Press, Oxford, 1977.

ОБ АВТОРЕ

Замышляев Виталий Иванович — кандидат технических наук.

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», старший научный сотрудник отдела русловых процессов.

Сл. адрес: 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23

E-mail: viza51@mail.ru

INFLUENCE OF THE CHANNEL ALLUVIUM PROPERTIES ON THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF BOTTOM DUNES

V.I. Zamyshlyaev

*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
viza51@mail.ru*

Abstract. The paper demonstrates that not all combinations of steepness and asymmetry parameters of riverbed dunes ensure their morphological stability. By comparing the “triangular” approximation describing the dune profile as a triangle and the dune profile approximation using a “sinusoidal” model (constructed by gluing two branches of a modified sinusoid), the influence of the approximation method choice on the permissible ranges of dune steepness and asymmetry parameter ratios is analyzed. It is established that the requirement of first derivative continuity (profile smoothness) at the trough and crest points, implemented in the “sinusoidal” model, imposes stricter constraints on dune geometry. It is shown that the maximum local slope of the back slope in the sinusoidal profile significantly exceeds the average slope of the corresponding triangular model. Based on the condition that the dune surface inclination angle must not exceed the angle of repose of the material from which the dune is composed, analytical relationships are derived to determine the critical steepness and critical asymmetry for “triangular” and “sinusoidal” dunes. Combined stability nomograms are constructed, enabling identification of zones with physically impossible parameter combinations for various types of bed sediments. The results can be used to verify bathymetric survey data and improve calculations of channel hydraulic resistance.

Keywords: river dunes, longitudinal profile, triangular approximation, sinusoidal approximation, slope stability, angle of repose, dune steepness, dune asymmetry

REFERENCES

- Abraham D., Kuhnle R., and Odgaard J.A. Validation of Bed-Load Transport Measurements with Time-Sequenced Bathymetric Data. *J. Hydraul. Eng.* 2011.137:723-728.
DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000357.
- Baryshnikov N.B. Dynamics of channel flows. St. Petersburg: RSHU Publ., 2007. 314 p. (in Russ.)
- Ferguson, R., Lewin, J., and Hardy, R. (2022). Fluvial processes and landforms. Geological Society, London, Memoirs. 58. M58-2021. 10.1144/M58-2021-18.
- Gutierrez, R. R., Abad, J. D., Parsons, D. R., and Best, J. L. (2013). Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Ro Parana, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3):1400-1418.
- Kostyuchenko A.A., Zavarzin R.V. A method for performing and processing measurements to determine bedform parameters // *Vodnye puti i usloviya protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: Sbornik nauchnykh trudov* [Waterways and channel processes. Hydraulic structures of waterways: Collection of scientific papers]. Issue 6, Part 1. St. Petersburg: Admiral Makarov University, 2023. P. 151–165 (in Russ.)
- Leary K.C.P. Estimating sand bed load in rivers by tracking dunes: a comparison of methods based on bed elevation time series / K.C.P. Leary, D. Buscombe // *Earth Surface Dynamics*. – 2020. – Vol. 8. – 13 p
- Libina N.V. Methods for processing and analyzing digital bottom relief models // *Okeanologiya*. 2022. Vol. 62. No. 2. P. 324–333.
DOI: 10.31857/S0030157422020125 (in Russ.)
- Núñez-Gonzalez, F., Hesse, D., Ettmer, B., Kume, E., and Link, O. (2014). Objective method for ranking bedforms with a 3-dimensionality-index, in: *River Flow 2014*, p. 1059-1065.
- Samsonov T.E. Cartographic methods of visualization and generalization of digital terrain models. Modern methods and technologies of digital terrain modeling in Earth sciences // *Sovremennyye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya rel'efa v nauках o Zemle*. Iss. 6. 2016. P. 9–18 (in Russ.)
- Schippa, L. and Cavalieri, I. (2021). Semiautomatic algorithm for the interpretation of the bedforms and statistical analysis. 169-179.
DOI: 10.2495/WRM210151
- Shinohara K. On the Characteristics of Sand Waves Formed upon Beds of the Open Channels and Rivers / K. Shinohara, T. Tsubaki // *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*. – 1959. – Vol. VII. – No. 25. – P. 15–45.
- Sidorchuk A. Estimation of bedload transport in a river channel considering data on active and passive bedform dynamics // *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2015. Vol. 42. No. 1. P. 31–44.
DOI: 10.7868/S0321059615010137 (in Russ.)
- Simons, D., Richardson, E., and Nordin, C., 1965, Bedload equation for ripples and dunes: U.S. Geological Survey Professional Paper 462, p. H1-H9,
DOI: 10.3133/pp462H
- Swart D. H. Predictive equations regarding coastal transports / D. H. Swart // *Proceedings of the Fifteenth Conference on Coastal Engineering*. – American Society of Civil Engineers, 1976. – Vol. II. – P. 1113–1132. DOI: 10.1061/9780872620834.066.
- Van Denderen, R. P., Schielen, R. M. J., Paarlberg, A. J., Reneerkens, M., and Augustijn, D. C. M. (2024). Analyzing natural bed-level dynamics to mitigate the morphological impact of river interventions. *River Research and Applications*, 40(5), 735–746.
DOI: 10.1002/rra.4270
- Van Rijn L. C. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness / L. C. Van Rijn // *Journal of hydraulic engineering*. – 1984. – Vol. 110. No. 12. P. 1733–1754. DOI: 10.1061/(ASCE)0733–9429(1984)110:12(1733).
- Yalin M.S. *Mechanics of Sediment Transport*. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- Zamyshlyaev V.I. Relationships between river dune parameters when approximating their longitudinal profile by a triangle // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2024. Vol. 16. No. 2. P. 236–250. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250 (in Russ.)
- Zamyshlyaev V.I. Approximation of the longitudinal profile of river dunes using sine wave branches. 2026 (in print) (in Russ.)
- Znamenskaya N.S. *Bedform-related sediment transport. Theory and practical applications*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 188 p. (in Russ.)

ABOUT THE AUTHOR

Zamyshlyaev Vitaly Ivanovich, FSBI «State Hydrological Institute». Candidate of technical sciences (PhD), Senior Researcher at the Department of Channel Processes.

Office address: 199004, Russian Federation, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23

E-mail: viza51@mail.ru

УДК 556.5

АППРОКСИМАЦИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ДОННЫХ ГРЯД ВЕТВЯМИ СИНУСОИДЫ

В.И. Замышляев

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

viza51@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2026

После доработки 18.05.2026

Принята к публикации 25.05.2026

Аннотация. Предложена математическая модель продольного профиля речных донных гряд, основанная на аппроксимации напорного склона и тылового откоса гряды двумя ветвями синусоиды с одинаковой амплитудой, но различными периодами и фазовыми сдвигами. В отличие от треугольной аппроксимации, модель обеспечивает гладкость (C^1 -непрерывность) профиля во всех характерных точках — в подвальях и на гребне, что устраняет проблему сингулярности при гидродинамических расчетах. Получены аналитические выражения для описания профиля как в виде кусочно-заданной функции, так и в виде единой функции, определенной на всей оси абсцисс, что удобно для использования в теоретических моделях и численных расчетах. Показано, что площади под ветвями синусоид в точности равны площадям соответствующих треугольников, образованных хордами, что позволяет использовать простые оценки для объемных характеристик гряд. Для длин дуг, выражающихся через эллиптические интегралы, выполнены численные расчеты в широком диапазоне параметров крутизны и асимметрии. Установлено, что относительное превышение длины «синусоидального» профиля над «треугольным» составляет 2–4%, что может быть значимым при расчетах гидравлического сопротивления и транспорта наносов. Построены семейства параметрических графиков, описывающих основные геометрические характеристики «синусоидальной» гряды. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании рельефа речного дна, оценке сопротивления русла и расчетах расхода донных наносов.

Ключевые слова: донные гряды, продольный профиль, синусоидальная аппроксимация, гладкость профиля, длина дуги, площадь сечения, крутизна гряды, асимметрия гряды

DOI: 10.71367/3034-4638-2026-2-2-53-65

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнано (Маккавеев, 1955; Гришанин, 1979; Чалов, 1979; Кондратьев и др., 1982; Van Rijn, 1984; Best, 2005), что знание геометрических характеристик донных гряд речного русла важно для решения многих задач речной гидравлики. Например, значительное количество методов оценки расхода донных наносов основаны на использовании параметров грядового рельефа речного дна (Simons et al., 1965; Знаменская, 1968; Allen, 1968; Yalin, 1972; Сنيщенко, Копалиани, 1978; Петровская, 2018). В теоретических и практических исследованиях чаще всего гряды рассматриваются в двухмерной постановке, и в этом случае

характеристиками гряд выступают характеристики их вертикального продольного профиля, причем, по мнению многих специалистов, занимающихся проблемами руслового процесса, характерная форма речных донных гряд близка к треугольной (Знаменская, 1968; Yalin, 1972; Снищенко, Копалиани, 1978; Гришанин, 1979; Allen, 1982; Van Rijn, 1984; Барышников, 2007; Gutierrez, 2013). Исходя из этой посылки, автором (Замышляев, 2024) были исследованы соотношения между параметрами донных гряд при аппроксимации их продольного сечения треугольником. Вместе с тем реальный профиль речных гряд всё же имеет более гладкую форму без изломов в вершинах треугольников.

Поэтому в данной работе поставлена задача найти такую аппроксимацию, которая в большей мере соответствовала бы естественным продольным профилям донных гряд и обеспечивала бы гладкость — C^1 -непрерывность — профиля (равенства нулю первой производной) в характерных точках: в начале, на гребне и в конце гряды. Это требование является важным для тех теоретических конструкций, в которые включены гидродинамические аспекты движения потока по дну русла, поскольку отсутствие гладкости, обусловленное изломами «треугольного» профиля дна, приводило бы к появлению сингулярных точек, в которых исследуемые физические величины стремятся к бесконечности, вследствие чего модели описания реальности перестают работать. В треугольной модели в точках подвалов и на гребне возникают изломы (разрывы первой производной). С точки зрения гидродинамики это критическая ошибка: в этих точках кривизна бесконечна, что приводило бы к нефизическим скачкам давления и скорости потока в математических расчетах.

Сформулируем задачу следующим образом: построить линию $Z(x)$, служащую аппроксимацией формы продольного профиля речной гряды, имеющей длину l и высоту h , причем расстояние от начала гряды до точки проекции ее гребня на горизонталь равно l_1 ; соответственно, расстояние l_2 от этой точки до конечной точки гряды равно

$$l_2 = l - l_1 \quad (1)$$

Представим аппроксимирующую линию в виде двух ветвей синусоиды: на первом участке, где продольная координата x меняется в пределах

$$0 \leq x \leq l_1, \quad (2)$$

искомая линия описывается функцией $Z = Z_1(x)$, а на втором участке, где продольная координата x меняется в пределах

$$l_1 < x \leq l_1 + l_2, \quad (3)$$

искомая линия описывается функцией $Z = Z_2(x)$. Будем искать такие выражения для этих ветвей синусоиды, чтобы они удовлетворяли равенствам:

$$\begin{aligned} Z_1(0) &= 0; Z_1(l_1) = h, \\ Z_2(l_1) &= h; Z_2(l_1 + l_2) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Общая форма синусоидальной функции имеет вид: $y = A_m \sin(\omega x + \varphi) + \delta$, где:

A_m — амплитуда;

$\omega = 2\pi/T$ — частота, связанная с периодом функции T ;

φ — фазовый сдвиг;

δ — вертикальный сдвиг

(в нашем случае A_m и δ равны половине высоты гряды, т. е. $A_m = \delta = h/2$). Тогда выражение для $Z = Z_1(x)$ на интервале $x \in [0, l_1]$, содержащее функцию $\sin$, будет иметь вид:

$$Z_1(x) = \frac{h}{2} \left[\sin \left(\pi \left(\frac{x}{l_1} - \frac{1}{2} \right) \right) + 1 \right] \quad (5)$$

(легко проверить, что эта функция удовлетворяет условию (4)). Этому выражению с помощью элементарных тригонометрических преобразований можно придать более элегантный вид:

$$Z_1(x) = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{l_1} \right) \quad (6)$$

Аналогичным образом выражение для $Z = Z_2(x)$ на интервале $x \in [l_1, l]$ можно представить в следующем виде:

$$Z_2(x) = \frac{h}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi(x - l_1)}{l_2} \right). \quad (7)$$

Эта функция также удовлетворяет условию (4). Профиль такой гряды для значений $h = 10$, $l_1 = 40$, $l_2 = 20$ представлен на рис. 1.

Самая высокая отметка гряды, обозначенная на рис. 1 точкой **B**, называется гребнем гряды. Полная длина (шаг) гряды l есть сумма длин двух отрезков: длины l_1 отрезка от начала гряды (точка **A**) до точки **D** — проекции гребня гряды на горизонталь — и длины l_2 отрезка от точки **D** до конца гряды (точка **C**). Отрезок **AD** назовем напорным плечом гряды, а отрезок **DC** — тыловым плечом гряды. Величины l , l_1 и l_2 связаны соотношением (1).

Длину верхового склона гряды между точками **A** и **B** обозначим через S_1 , а длину низового склона (откоса) между точками **B** и **C** — через S_2 . Прямолинейные отрезки **AB** и **BC** можно в данном случае назвать хордами гряды; их длины обозначим через L_1 и L_2 . Как было показано в работе (Замышляев, 2024), треугольник **ABC** во многих случаях может служить достаточно хорошей аппроксимацией формы продольного вертикального сечения гряды.

Введем некоторые понятия, характеризующие геометрию продольного сечения гряды, и соответствующие им обозначения. Отношение высоты гряды h к ее длине l , обычно называемое крутизной гряды (Simons and Richardson, 1966; Знаменская, 1968; Гришанин, 1979; Van Rijn, 1984), будем обозначать через σ , т. е.

$$\sigma = h/l \quad (8)$$

Асимметрию гряды можно выражать через различные безразмерные параметры, подробно рассмотренные в работе (Замышляев, 2024), например, через угол наклона тылового склона дюн

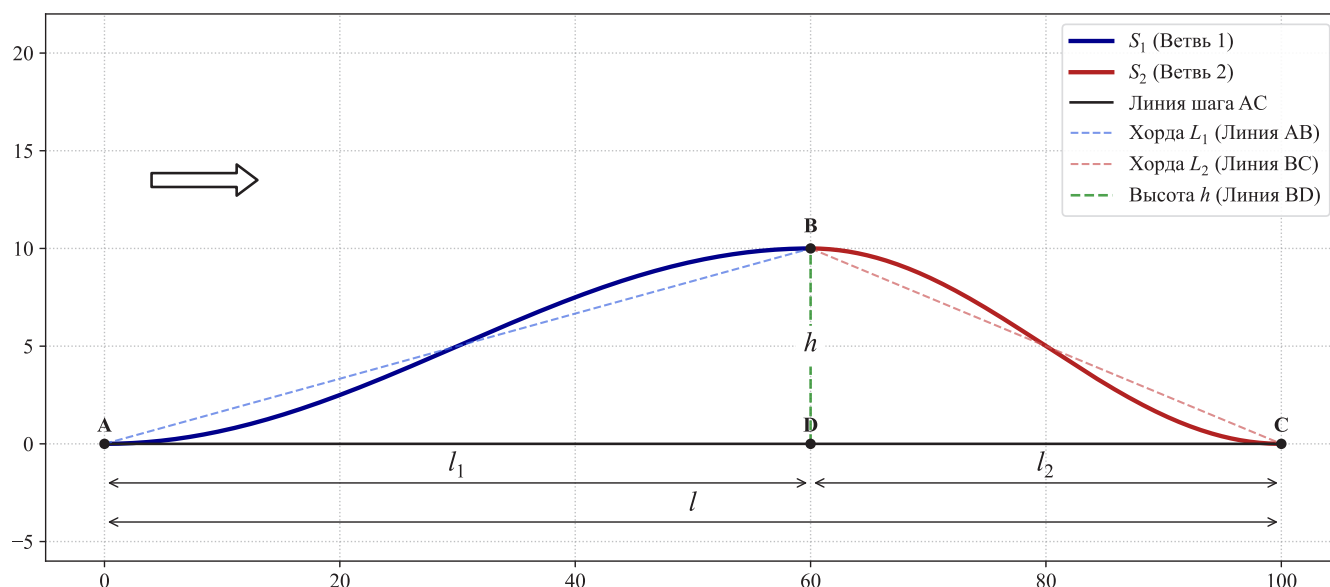


Рис. 1. Продольный профиль «синусоидальной» гряды при $h = 10$, $l_1 = 40$, $l_2 = 20$, $l = 60$, $a = 0.667$, $\sigma = 0.167$ (поток слева направо)

Fig. 1. Longitudinal profile of a «sinusoidal» dune at $h = 10$, $l_1 = 40$, $l_2 = 20$, $l = 60$, $a = 0.667$, $\sigma = 0.167$ (flow from left to right)

(Cisneros et al., 2020; Wu, 2021), но здесь в качестве основного показателя асимметричности мы используем следующую величину:

$$a = l_1/l \quad (9)$$

(схожим образом асимметрия определяется в работе (Lefebvre et al., 2016)). Длина напорного склона речных гряд практически всегда превышает длину тылового склона. Таким же образом соотносятся между собой длины плеч напорного и тылового склонов, а потому для коэффициента асимметричности a справедливо следующее неравенство:

$$0.5 \leq a < 1. \quad (10)$$

В работе (Замышляев, 2024) на основе тригонометрических соотношений для треугольников были выведены отношения для различных параметров, характеризующих плановую форму гряды, и построены соответствующие графики. В настоящей работе исследуются аналогичные показатели для гряд, продольное сечение которых описывается ветвями синусоиды, т. е. выражениями (6) и (7). Соответственно, представлены выражения для определения длины каждой ветви S_1 и S_2 и общей длины профиля продольного сечения гряды $S = S_1 + S_2$. В работе (Замышляев, 2024) длина $L = L_1 + L_2$ названа смоченным периметром гряды, поскольку при аппроксимации гряды треугольником именно на этой длине происходит касание потока с телом гряды. При аппроксимации гряды ветвями синусоиды

есть смысл считать смоченным периметром гряды длину ее изогнутого профиля S . Графики для параметров L_1/l_1 , L_2/l_2 , L/l были представлены в работе (Замышляев, 2024). Представлены также выражения для определения площади под каждой из ветвей P_1 и P_2 , а также общей площади под профилем продольного сечения гряды $P = P_1 + P_2$. Программа также позволяла построить семейства параметрических графиков для зависимостей безразмерных параметров S_1/L_1 , S_2/L_2 , S/L , S_1/l_1 , S_2/l_2 , S/l от показателя $\sigma = h/l$ при различных значениях коэффициента асимметричности $a = l_1/l$.

Поскольку не все искомые параметры можно выразить аналитически, в частности, длину каждой ветви S_1 и S_2 , для получения их значений и построения графиков использовались численные методы, реализованные с помощью программы на Питоне.

Функции, выражаемые уравнениями (6) и (7), могут рассматриваться как кусочно-заданная функция, областью определения которой является интервал $x \in [0, l]$. Такое описание профиля гряды через две функции, каждая из которых определена лишь на части гряды, может доставлять определенные трудности при использовании подобного подхода в различных теоретических построениях. Для устранения этого неудобства ниже предложена единая функция, описывающая подобные «синусоидальные» профили не только на интервале $x \in [0, l]$ (т. е. на длине гряды), но и на всей оси x .

АНАЛИЗ

Для определения длины ветвей синусоиды S_1 и S_2 воспользуемся известными соотношениями дифференциальной геометрии, которые определяют эти величины через выражения для производных

$$S = \int \sqrt{1 + (Z'(x))^2} dx. \quad (11)$$

Производные для функций $Z = Z_1(x)$ и $Z = Z_2(x)$ имеют вид:

$$Z'_1(x) = \frac{\pi h}{2l_1} \sin\left(\frac{\pi x}{l_1}\right) \quad (12)$$

$$Z'_2(x) = \frac{\pi h}{2l_2} \sin\left(\frac{\pi(x-l_1)}{l_2}\right) \quad (13)$$

Тогда длина S_1 первой ветви равна:

$$S_1 = \int_0^{l_1} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi h}{2l_1}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_1}\right)} dx \quad (14)$$

Аналогичным интегралом выражается и длина S_2 :

$$S_2 = \int_{l_1}^{l_1+l_2} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi h}{2l_2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi(x-l_1)}{l_2}\right)} dx \quad (15)$$

Поскольку данные интегралы являются эллиптическими и не выражаются в элементарных функциях, для их вычисления применяются методы численного интегрирования.

С определением площадей всё гораздо проще, поскольку площадь под кривой есть определенный интеграл от функции, выражающей эту кривую. Площадь P_1 под кривой на участке $[0, l_1]$ определяется следующим образом:

$$P_1 = \int_0^{l_1} \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{l_1}\right) dx = \frac{hl_1}{2}, \quad (16)$$

а площадь P_2 под кривой на участке $[l_1, l]$ равна:

$$P_2 = \int_{l_1}^l \frac{h}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi(x-l_1)}{l_2}\right) dx = \frac{hl_2}{2}, \quad (17)$$

т. е. для выбранных кривых площади P_1 и P_2 равны полупроизведению высоты гряды h на длину ее соответствующего плеча l_1 или l_2 . Тогда полная площадь фигуры на промежутке $x \in [0, l]$ есть

$$P = P_1 + P_2 = h \cdot (l_1 + l_2)/2 = (h \cdot l)/2 \quad (18)$$

Таким образом, площадь фигуры под ветвями синусоид в точности равна площади аппроксимирующего треугольника, образованного хордами L_1 и L_2 .

До сих пор мы описывали профиль гряды в виде кусочно-заданной функции, т. е. функций (6) и (7) на двух интервалах, в сумме равных длине шага гряды. Перейдем теперь к построению единого аналитического выражения $Z(x)$, описывающего профиль гряды на всем интервале $x \in [0, l]$. Это можно сделать, приняв длину напорного плеча гряды l_1 за центр локальной системы координат (путем «растяжения» аргумента); тогда выражение для $Z(x)$ приобретет вид:

$$Z(x) = \frac{h}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi(x-l_1)}{(l_1+l_2+(l_1-l_2)\operatorname{sgn}(l_1-x))}\right) + 1 \right] = \frac{h}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi(x-l_1)}{F(x)}\right) + 1 \right], \quad (19)$$

где sgn (сигнум) — кусочно-постоянная функция вещественного аргумента, определяемая следующим образом:

$$\operatorname{sgn}(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi > 0 \\ 0, & \xi = 0 \\ -1, & \xi < 0 \end{cases} \quad (20)$$

а обозначенный через $F(x)$ знаменатель дроби в выражении (19) принимает следующие значения:

$$F(x) = \begin{cases} 2l_1 & \text{если } x < l_1 \\ l & \text{если } x = l_1 \\ 2l_2 & \text{если } x > l_1 \end{cases} \quad (21)$$

причем в точке $x = l_1$ аргумент косинуса равен 0, и следовательно, $\cos(0) = 1$. Тогда для функции $Z(x)$, описываемой уравнением (19), на интервале $x \in [0, l]$ выполняются условия (4), изначально задаваемые как обязательные для описывающей гряду кусочной функции, состоящей из двух ветвей синусоиды:

$$Z(0) = 0; \quad Z(l_1) = h; \quad Z(l) = 0. \quad (22)$$

Можно также предложить функцию, которая будет описывать на всей оси x цепочку одинаковых волн, подобных той, что изображена на рис. 1, и для которой будут выполняться условия, аналогичные условиям (4) или (22). Для этого необходимо ввести локальную координату, представляющую собой деление переменной x по модулю l :

$$\xi = x \pmod{l}. \quad (23)$$

Тогда единая функция $Z_u(x)$ на всей оси x — для бесконечной цепочки волн — примет вид*:

$$Z_u(x) = \frac{h}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi(\xi-l_1)}{F(\xi)}\right) + 1 \right], \quad (24)$$

Например, профиль для цепочки из трех одинаковых волн, описываемый этой функцией, будет иметь вид, приведенный на рис. 2.

*Функция $F(\xi)$ в выражении (24) принимает те же значения, что и функция $F(x)$ в равенстве (21).



Рис. 2. Цепочка из трех одинаковых гряд ($h = 10$, $l_1 = 40$, $l_2 = 20$), описываемая уравнением (24)

Fig. 2. A chain of 3 identical dunes ($h = 10$, $l_1 = 40$, $l_2 = 20$) described by equation (24)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В разработанном программном комплексе на языке Python расчет выполнен с использованием алгоритма **QUAD** (библиотека SciPy), который базируется на методе Кронрода (Кронрод, 1969), представляющем собой модификацию метода Гаусса. С помощью данной программы для различных значений коэффициента асимметричности гряды a были с высокой точностью (относительная погрешность не более $1.49 \cdot 10^{-8}$) рассчитаны значения относительных величин S_1/L_1 , S_2/L_2 , S/L , S_1/l_1 , S_2/l_2 , S/l , S_1/h , S_2/h , S/h и др. в функции от показателя крутизны гряды σ .

Для построения параметрических графиков указанных зависимостей необходимо было выбрать диапазоны изменения переменных, выбранных в качестве аргумента/параметра, т. е. диапазоны изменения a и σ . В работе (Замышляев, 2024) для построения зависимости величин L_1/l_1 , L_2/l_2 , L/l от значений коэффициентов крутизны σ и асимметричности a гряд был произведен обзор ряда работ по исследованию гряд и были проанализированы диапазоны значений σ и a , указанных в этих работах. Что касается крутизны гряд, ни в каких из рассмотренных публикаций (Shinohara, 1959; Знаменская, 1968; Swart, 1976; Van Rijn, 1984; Барышников, 2007) этот показатель не превышал значения 0.5. В то же время некоторые авторы в качестве нижней границы указывали крайне малые значения этого параметра, вплоть до значения 0.005. На наш взгляд, значение $\sigma = 0.01$, а тем более $\sigma = 0.005$ свидетельствует скорее о неверной интерпретации случайных отклонений на батиграммах, а не о существовании столь пологих донных форм. Тем не менее, чтобы покрыть максимально полный диапазон значений, приводимых в различных исследованиях, значения показателя крутизны гряд в настоящей работе приняты лежащими в следующем интервале:

$$0.01 \leq \sigma \leq 0.55. \quad (25)$$

Профиль типичной речной гряды характеризуется тем, что длина ее напорного склона превышает — чаще всего значительно — длину ее тылового откоса. Так же соотносятся показатели длины напорного и тылового плеча гряды, что означает, что для коэффициента асимметричности гряды $a = l_1/l$ выполняется соотношение $a > 0.5$. Исследований по предельным верхним значениям этого коэффициента нам найти не удалось. Очевидно, что абсолютно лимитирующим будет значение $a = 1$, при превышении которого у гряды должен был бы появляться «козырек», что, по крайней мере, для несвязных грунтов невозможно. Оставляя вопрос о максимальном значении этого параметра и его связи с показателем крутизны гряды для дальнейшего исследования, здесь лишь отметим, что для построения параметрических графиков коэффициент асимметричности гряды принимался меняющимся в следующих пределах:

$$0.50 \leq a \leq 0.90. \quad (26)$$

Графики рассчитанных таким образом зависимостей указанных выше параметров синусоидальной гряды от крутизны гряды при заданных значениях коэффициента асимметричности гряды приведены на рис. 3–11.

Графики на рис. 3–5 показывают, что отношение общей длины профиля синусоиды к длине «треугольного» смоченного периода S/L , так же как и отношение длины верхнего и нижнего крыльев синусоиды к длине соответствующих хорд, всегда больше 1.0, т. е. длина ветвей и общая длина смоченного периода для «синусоидальной» модели превышают соответствующие параметры для «треугольной» модели (см. таблицу 1).

С одной стороны, такое превышение не слишком велико — максимальные отклонения в районе 2–4%, и потому, если требуется лишь оценить чис-

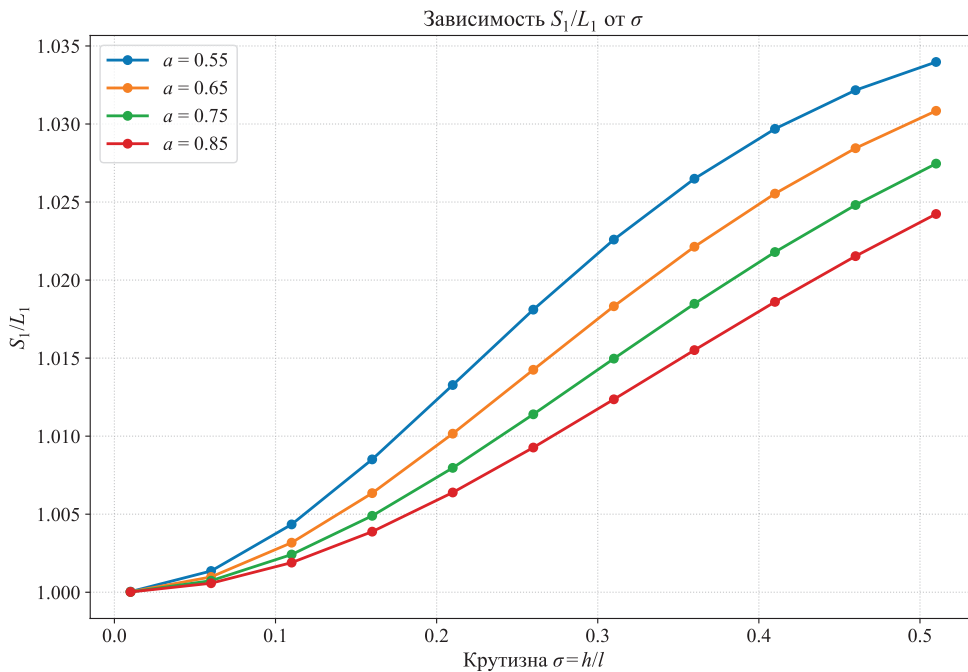


Рис. 3. Соотношение S_1/L_1 между длиной ветви «синусоидальной» гряды и хорды «треугольной» гряды для напорного склона при различных значениях σ и a

Fig. 3. Ratio S_1/L_1 between the lengths of the «sinusoidal» dune branch and the «triangular» dune chord for the stoss side (upstream slope) at various σ and a values

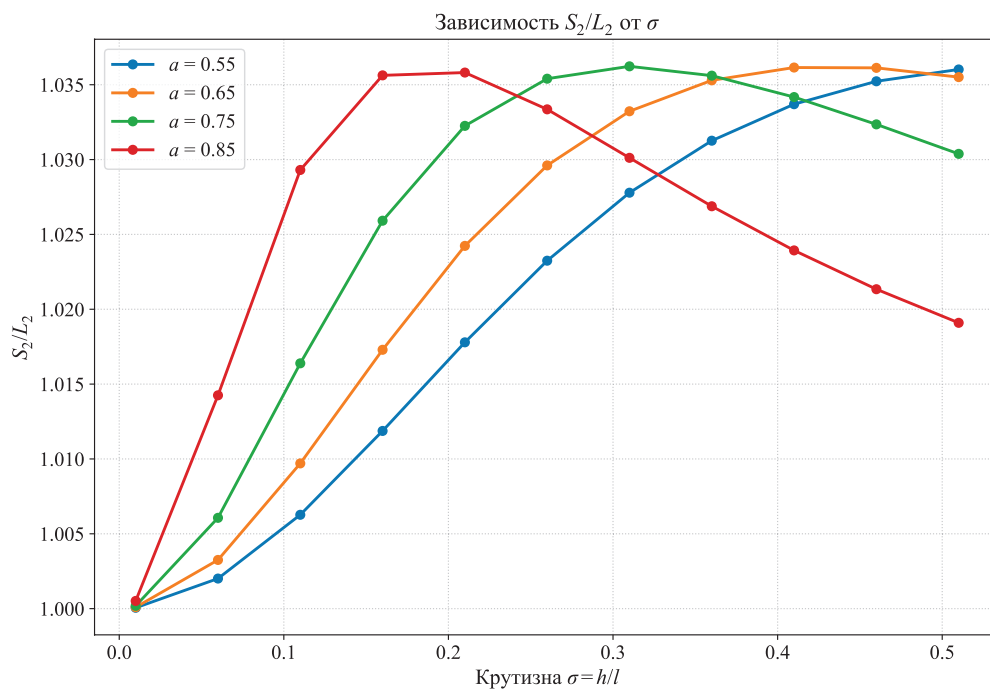


Рис. 4. Соотношение S_2/L_2 между длиной ветви «синусоидальной» гряды и хорды «треугольной» гряды для тылового склона при различных значениях σ и a

Fig. 4. Ratio S_2/L_2 between the lengths of the «sinusoidal» dune branch and the «triangular» dune chord for the lee side (downstream slope) at various σ and a values

ленные значения указанных характеристик, вполне достаточно использовать параметры вписанного треугольника. Если же требуется рассчитать касательные напряжения на дне, силу сопротивления потока или интенсивность транспорта наносов, то для таких расчетов важно учитывать реальную «выпуклость» склонов и увеличение поверхности гряды, а потому необходимо использовать «синусоидальную» модель и вести расчет длины смоченного периметра через эллиптические интегралы.

Обращает на себя внимание тот факт, что параметр $\Delta S/L$, отражающий разницу в значениях смоченного периметра для «синусоидальной» и «треугольной» модели, ведет себя неодинаково при различных значениях крутизны и асимметрии: при малой крутизне эта разница растет с ростом асимметрии, а при большой крутизне ($\sigma \geq 0.3$) — падает. Это объясняется тем, что при малой крутизне и большой асимметрии напорный склон становится очень длинным и пологим, а потому на этом участ-

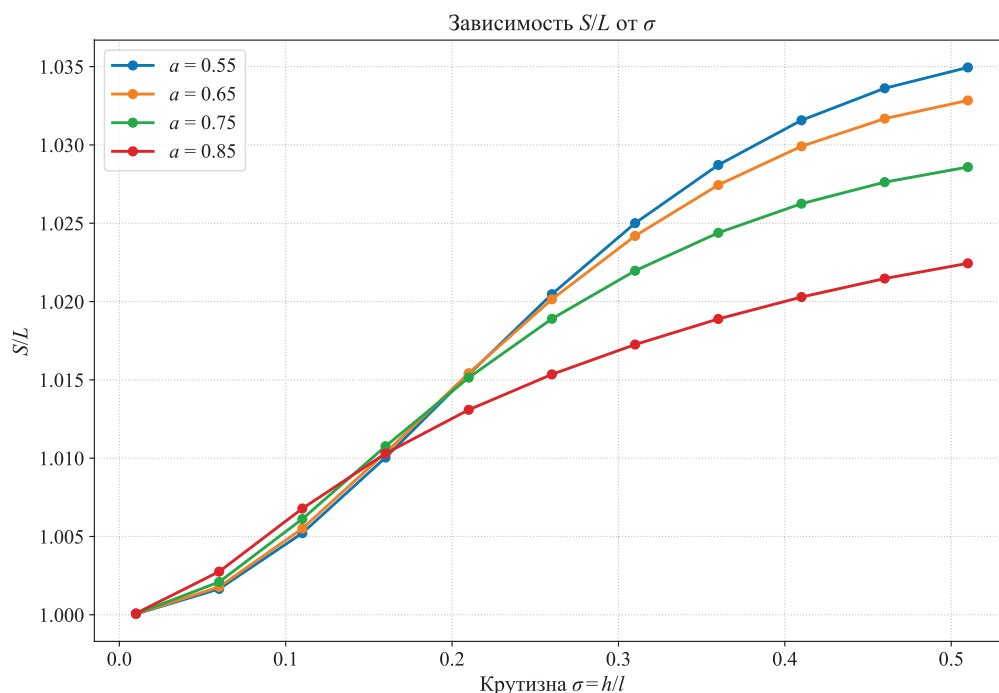


Рис. 5. Соотношение S/L между значениями смоченного периметра для «синусоидальной» и «треугольной» гряды при различных значениях σ и a

Fig. 5. Ratio S/L between the wetted perimeter values for «sinusoidal» and «triangular» dunes at various σ and a values

ке отклонение синусоиды от прямой минимально. На тыловом склоне разница в длине синусоиды и прямой гораздо больше, однако он значительно короче напорного — сравните графики на рис. 3 и 4, характеризующие поведение отношения длины ветвей и хорд для напорного и тылового склона гряды. Именно это сочетание противоположных трендов определяет итоговый характер поведения параметра $\Delta S/L$, отраженный в таблице 1.

Примерно так же обстоят дела с площадями под линией гряды: хотя итоговая площадь под

криволинейным профилем совпадает с площадью треугольников, тем не менее распределение массы под кривой несколько иное, и если для каких-то расчетов требуется точное распределение массы по длине гряды, то следует использовать «синусоидальную» модель, лучше соответствующую реальным профилям донных гряд, формируемым под воздействием придонных токов.

Наконец, предлагаемая модель обеспечивает гладкость профиля, что устраняет проблему сингулярности. В треугольной модели в точках подва-

Таблица 1. Сравнение параметров для «треугольной» и «синусоидальной» моделей

Table 1. Comparison of parameters for “triangular” and “sinusoidal” models

Крутизна $\sigma = h/l$	Асимметрия $a = l_1/l$	L/l (Треугольник)	S/l (Синусоида)	Разница $\Delta S/L$ (%)
0.1	0.5	1.019	1.024	0.43
	0.6	1.020	1.025	0.44
	0.7	1.023	1.028	0.48
	0.8	1.029	1.035	0.56
0.3	0.5	1.166	1.194	2.42
	0.6	1.170	1.198	2.39
	0.7	1.185	1.212	2.26
	0.8	1.214	1.238	1.95
0.5	0.5	1.414	1.463	3.49
	0.6	1.421	1.469	3.39
	0.7	1.443	1.487	3.08
	0.8	1.481	1.519	2.55

лий и на гребне линии профиля образуют углы, и соответственно в этих точках имеем разрыв первой производной аппроксимирующей функции. С точки зрения гидродинамики это критическая ошибка: в этих точках кривизна бесконечна, что приводило бы в математических расчетах к нефизическим скачкам давления и скорости потока. В предложенной модели производная функции $Z(x)$ в указанных точках строго равна нулю, что обеспечивает плавное обтекание донной формы потоком.

В соответствии с введенным нами определением крутизны $\sigma = h/l$ отношение S/h может быть представлено в виде

$$S/h = (S/l) \cdot (l/h) = (S/l)/\sigma, \quad (27)$$

а потому зависимости, представленные на рис. 9–11, являются гиперболическими, чем объясняется асимптотический рост на этих графиках величин S_1/h , S_2/h и S/h при $\sigma \rightarrow 0$.

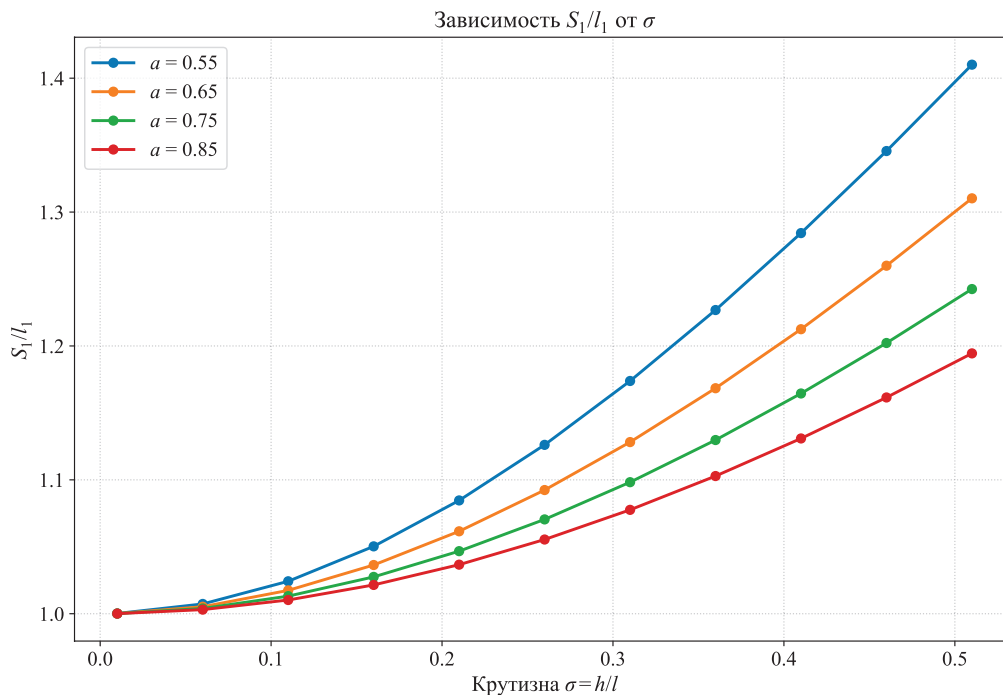


Рис. 6. Зависимость относительной длины напорного склона гряды S_1/l_1 от σ

Fig. 6. Dependence of the relative stoss side length S_1/l_1 on σ

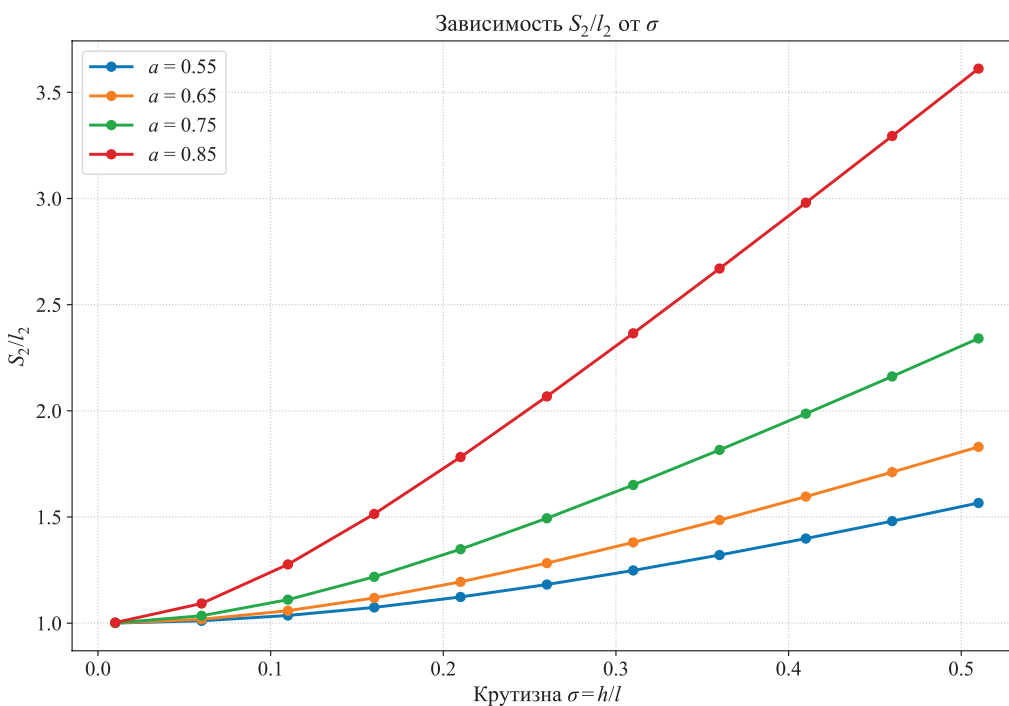


Рис. 7. Зависимость относительной длины тылового откоса гряды S_2/L_2 от σ

Fig. 7. Dependence of the relative lee side length S_2/L_2 on σ

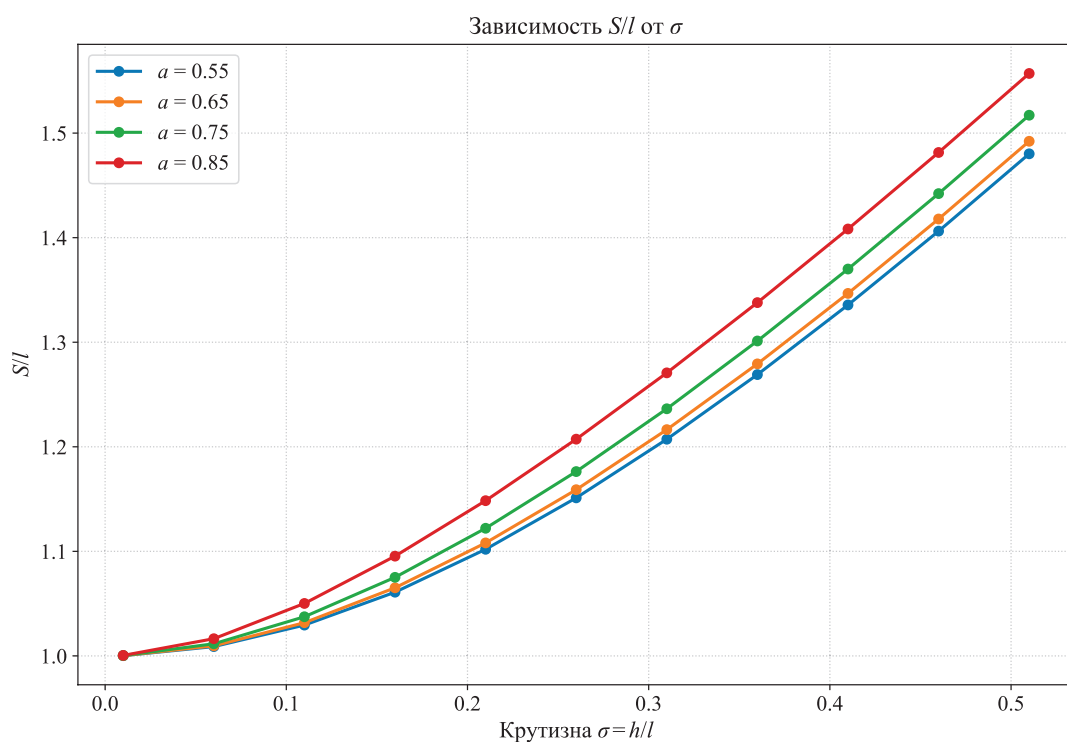


Рис. 8. Зависимость относительного смоченного периметра гряды S/l от σ

Fig. 8. Dependence of the relative wetted perimeter S/l on σ

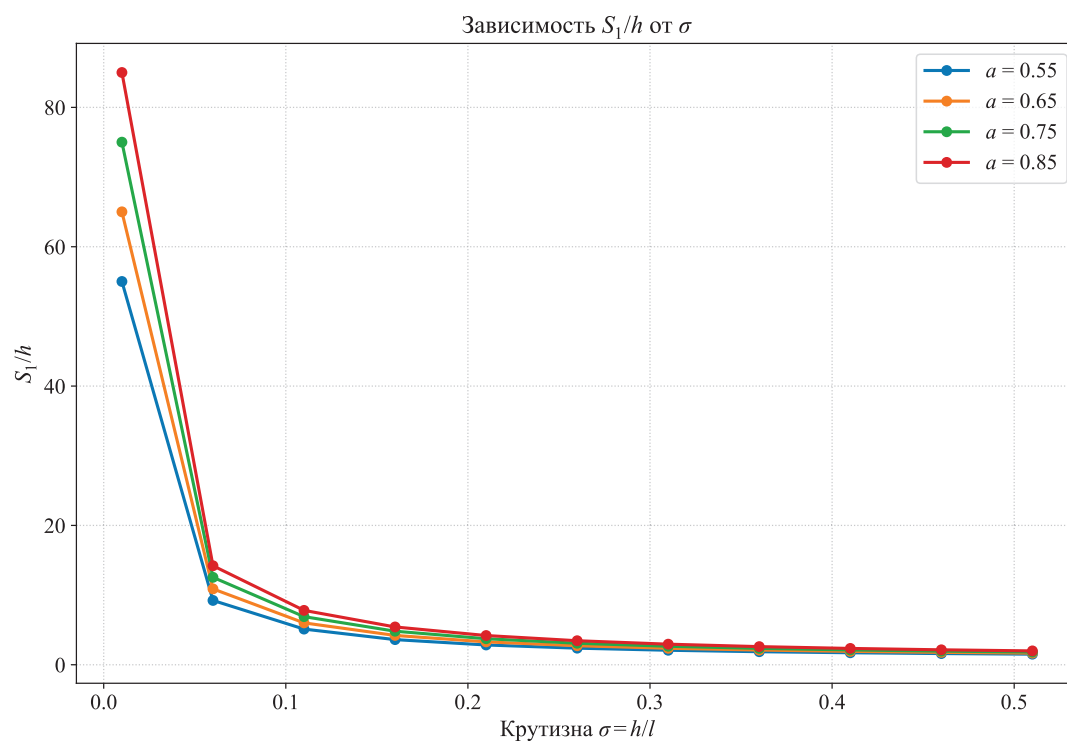


Рис. 9. Зависимость относительной длины напорного склона гряды S_1/h от σ

Fig. 9. Dependence of the relative stoss side length S_1/h on σ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена математическая модель продольного профиля речных донных гряд, основанная на использовании кусочно-заданной функции, описывающей напорный склон и тыловой откос гряды двумя ветвями синусоиды, имеющими одинаковую

амплитуду, но различные периоды и сдвиги по фазе. Вместо такой кусочной функции, заданной на интервале, равном длине гряды, может быть использована заданная на всей оси x единая аналитическая функция описания профиля, также предложенная в работе. Описание профиля гряды через единую аналитическую функцию особенно

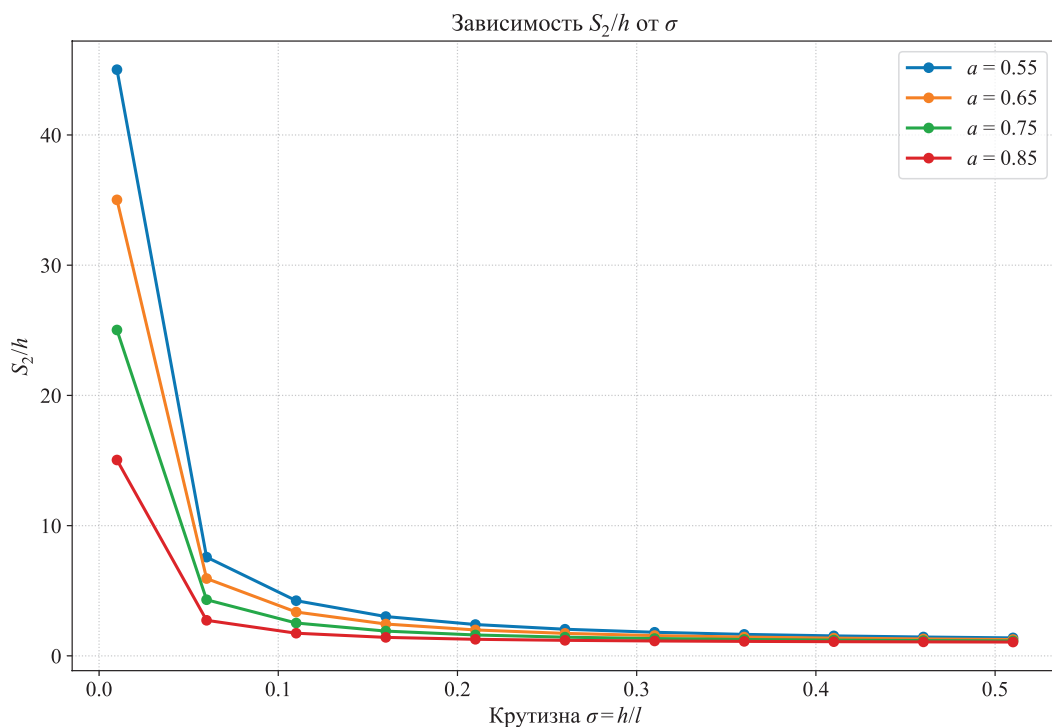


Рис. 10. Зависимость относительной длины тылового откоса гряды S_2/h от σ

Fig. 10. Dependence of the relative lee side length S_2/h on σ

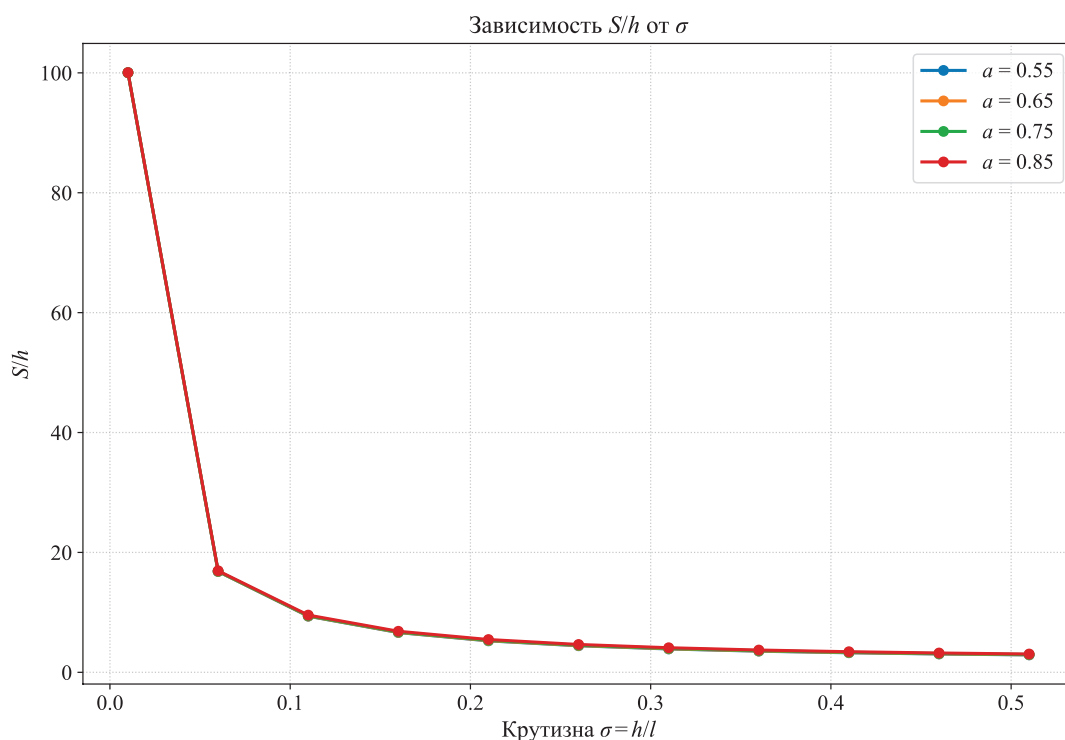


Рис. 11. Зависимость относительной длины смоченного периметра гряды S/h от σ

Fig. 11. Dependence of the relative wetted perimeter S/h on σ

удобно для использования в теоретических моделях и численных расчетах.

В отличие от аппроксимации формы гряды треугольником, при которой профиль треугольной гряды имеет изломы в точках пересечения сторон треугольника, т. е. в точках сопряжения гряд и на их гребнях, аппроксимация ветвями синусоиды

предполагает использование функции, являющейся непрерывной и гладкой во всех точках гряды, включая ее гребень и подвалья, где кривизна строго равна нулю. Это обстоятельство предопределяет принципиальное преимущество «синусоидальной» модели перед «треугольной», поскольку устраняет проблему сингулярности в указанных точках и

обеспечивает плавное обтекание донной формы потоком.

Для длины дуг, выражающихся через эллиптические интегралы, проведены численные расчеты в широком диапазоне параметров крутизны $0.01 \leq \sigma \leq 0.55$ и асимметрии $0.50 \leq a \leq 0.90$ и построены семейства параметрических графиков, описывающих основные геометрические характеристики «синусоидальной» гряды: относительную длину напорных и тыловых склонов гряды, длину смоченного периметра гряды, площадь продольного сечения гряды и т. д. Эти зависимости показывают связь указанных параметров со значениями показателей крутизны и асимметричности гряды и могут быть использованы для оценки соотношений этих показателей в условиях ограничений, накладываемых различными физическими факторами, такими как угол естественного откоса составляющего гряду донного материала.

Полученные аналитические выражения для профиля гряды могут стать основой для построения трехмерных рельефов донных гряд и моделирования рельефа донного дна, а также могут быть использованы в расчетах, связанных с определением сопротивления русла, расхода донных наносов, геометрических характеристик русла и судового хода.

ЛИТЕРАТУРА

Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков / Н.Б. Барышников. — СПб.: изд. РГГМУ, 2007. — 314 с.

Гладков Г.Л. Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов / Г.Л. Гладков, П.В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 52–63.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 312 с.

Замышляев В.И. Соотношения между параметрами донных гряд при аппроксимации их продольного сечения треугольником / В.И. Замышляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 236–250.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250.

Знаменская Н.С. Грядовое движение наносов. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968. — 188 с.

Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сنيщенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового

процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.

Кронрод М.А. Оптимальный алгоритм упорядочения без рабочего поля // Докл. АН СССР, 1969, т. 186, № 6, с. 1256–1258.

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

Петровская О.А. Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек : дис. ... канд. техн. наук / ФГБУН Институт водных проблем РАН. 2019. 252 с.

Снищенко Б.Ф., Копалиани З.Д. О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях // Тр. ГГИ. — 1978. — Вып. 252. — С. 20–37.

Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. — 232 с.

Allen J.R.L. (1968) The nature and origin of bed-form hierarchies. *Sedimentology*. 10: 161-182.

DOI: 10.1111/j.1365-3091.1968.tb01110.x

Allen, J.R.L. (1982) *Sedimentary Structures: Their Character and Physical Basis*. In: Allen, J.R.L., Ed., *Developments in Sedimentology*, Elsevier, Amsterdam, 1-593.

Best, J. (2005) The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions, *J. Geophys. Res.*, 110, F04S02, DOI: 10.1029/2004JF000218.

Cheng H. // *Geomorphology*. — 2021. — Vol. 385. — P. 107733. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107733.

Cisneros J. Dunes in the world's big rivers are characterized by low-angle lee-side slopes and a complex shape / J. Cisneros, J. Best, T. van Dijk, R. P. D. Almeida, M. Amsler, J. Boldt, B. Frietas, C. Galeazzi, R. Huizinga, M. Ianniruberto, H. Ma, J. Nittrouer, K. Oberg, O. Orfeo, D. Parsons, R. Szupiany, P. Wang, Y. Zhang // *Nature Geoscience*. — 2020. — Vol. 13. — Is. 2. — P. 156–162.

DOI: 10.1038/s41561-019-0511-7.

Gutierrez R.R. Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Río Paraná, Argentina / R. R. Gutierrez, J. D. Abad, D. R. Parsons, J. L. Best // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. — 2013. — Vol. 118. — Is. 3. — P. 1400–1418.

DOI: 10.1002/jgrf.20102.

Lefebvre A. Characterising natural bedform morphology and its influence on flow / A. Lefebvre, A. J. Paarlberg, C. Winter // *Geo-marine letters*. — 2016. — Vol. 36. — P. 379–393.

DOI: 10.1007/s00367-016-0455-5

Scheiber L. The influence of geometric definitions on dune characteristics / L. Scheiber, A. Lefebvre // MARID VII. Seventh International Conference on Marine and River Dune Dynamics. Rennes, France, 3-5 April 2023. — 2023. — P. 293–297.

Shinohara K. On the Characteristics of Sand Waves Formed upon Beds of the Open Channels and Rivers / K. Shinohara, T. Tsubaki // Reports of Research Institute for Applied Mechanics. — 1959. — Vol. VII. — No. 25. — P. 15–45.

Simons D. B. and Richardson E. V. (1962). Resistance to flow in alluvial channels. Journal of the Hydraulics Division, ASCE. 86. 73-99. 10.1061/JYCEAJ.0000716.

Simons, D. B., E. V. Richardson and C. F. Nordin, Jr. Bedload equation for ripples and dunes. USGS professional paper 462-H. Washington: US GPO, 1965. DOI: 10.3133/pp462H

Swart D.H. Predictive equations regarding coastal transport / D. H. Swart // Proceedings of the Fifteenth Conference on Coastal Engineering. — American Society of Civil Engineers, 1976. — Vol. II. — P. 1113–1132. DOI: 10.1061/9780872620834.066.

Van Rijn L.C. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness / L. C. Van Rijn // Journal

of hydraulic engineering. — 1984. — Vol. 110. — No. 12. — P. 1733–1754.

DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).

Yalin M.S. Mechanics of sediment transport. — Pergamon Press. — 1972. — 290 p.

Wu S. Riverbed dune morphology of the Lowermost Mississippi River—Implications of leeside slope, flow resistance and bedload transport in a large alluvial river / S. Wu, Y. J. Xu, B. Wang, H. Cheng // Geomorphology. — 2021. — Vol. 385, — 107733.

ОБ АВТОРЕ

Замышляев Виталий Иванович
ФГБУ «Государственный гидрологический институт», кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела русловых процессов.

Сл. адрес: 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23

E-mail: viza51@mail.ru
+7 921 967-1369

APPROXIMATION OF THE LONGITUDINAL PROFILE OF RIVER DUNES USING SINE WAVE BRANCHES

V.I. Zamyshlyaev

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
viza51@mail.ru

Abstract. A mathematical model of the longitudinal profile of river dunes is proposed, based on the approximation of the stoss and lee sides of the dune by two sine wave branches with identical amplitudes but different periods and phase shifts. Unlike the triangular approximation, this model ensures profile smoothness (C1-continuity) at all characteristic points — at the crest and in the troughs — eliminating the singularity problem in hydrodynamic calculations. Analytical expressions are obtained to describe the profile both as a piecewise function and as a unified analytical function defined over the entire abscissa axis, which is convenient for use in theoretical models and numerical simulations. It is shown that the areas under the sine wave branches are exactly equal to the areas of the corresponding triangles formed by chords, allowing for the use of simple estimates for dune volume characteristics. For arc lengths expressed through elliptic integrals, numerical calculations were performed across a wide range of steepness and asymmetry parameters. It was established that the relative excess of the «sinusoidal» profile length over the «triangular» one is 2–4%, which can be significant in calculations of hydraulic resistance and sediment transport. Families of parametric plots describing the main geometric characteristics of the «sinusoidal» dune are constructed. The results obtained can be used for riverbed relief modeling, channel resistance assessment, and bedload discharge calculations.

Keywords: river dunes, longitudinal profile, sinusoidal approximation, profile smoothness, arc length, cross-sectional area, dune steepness, dune asymmetry

REFERENCES

Allen J.R.L. (1968) The nature and origin of bed-form hierarchies. Sedimentology. 10: 161-182.

DOI: 10.1111/j.1365-3091.1968.tb01110.x

Allen, J.R.L. (1982) Sedimentary Structures: Their Character and Physical Basis. In: Allen, J.R.L., Ed., Developments in Sedimentology, Elsevier, Amsterdam, 1-593.

Baryshnikov N.B. Dynamics of channel flows. St. Petersburg: RSHU Publishing, 2007. 314 p. (in Russ.)

Best, J. (2005) The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions, J. Geophys. Res., 110, F04S02, DOI: 10.1029/2004JF000218.

Chalov R.S. Geographical studies of channel processes. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1979. 232 p. (in Russ.)

- Cheng H. // *Geomorphology*. — 2021. — Vol. 385. — P. 107733. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107733.
- Cisneros J. Dunes in the world's big rivers are characterized by low-angle lee-side slopes and a complex shape / J. Cisneros, J. Best, T. van Dijk, R. P. D. Almeida, M. Amsler, J. Boldt, B. Frietas, C. Galeazzi, R. Huizinga, M. Ianniruberto, H. Ma, J. Nittrouer, K. Oberg, O. Orfeo, D. Parsons, R. Szupiany, P. Wang, Y. Zhang // *Nature Geoscience*. — 2020. — Vol. 13. — Is. 2. — P. 156–162.
DOI: 10.1038/s41561-019-0511-7.
- Gladkov G.L., Belyakov P.V. Sediment transport in rivers: dependence of bedform parameters on determining factors // *Vestnik of Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and River Fleet*. 2021. Vol. 13. No. 1. P. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63> (in Russ.)
- Grishanin K.V. Dynamics of channel flows. 2nd ed., rev. and augm. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 312 p. (in Russ.)
- Gutierrez R.R. Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Río Paraná, Argentina / R. R. Gutierrez, J. D. Abad, D. R. Parsons, J. L. Best // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. — 2013. — Vol. 118. — Is. 3. — P. 1400–1418.
DOI: 10.1002/jgrf.20102.
- Kondratiev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Fundamentals of the hydromorphological theory of channel processes. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 272 p. (in Russ.)
- Kronrod M.A. Optimal ordering algorithm without workspace // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1969. Vol. 186. No. 6. P. 1256–1258 (in Russ.)
- Lefebvre A. Characterising natural bedform morphology and its influence on flow / A. Lefebvre, A. J. Paarlberg, C. Winter // *Geo-marine letters*. — 2016. — Vol. 36. — P. 379–393.
DOI: 10.1007/s00367-016-0455-5
- Makkaveev N.I. River channel and erosion in its basin. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1955. 347 p. (in Russ.)
- Petrovskaya O.A. Optimization of methods for calculating bedload transport considering hydraulic parameters of rivers. PhD thesis in technical sciences / Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences. 2019. 252 p. (in Russ.)
- Scheiber L. The influence of geometric definitions on dune characteristics / L. Scheiber, A. Lefebvre // *MARID VII. Seventh International Conference on Marine and River Dune Dynamics*. Rennes, France, 3–5 April 2023. — 2023. — P. 293–297.
- Shinohara K. On the Characteristics of Sand Waves Formed upon Beds of the Open Channels and Rivers / K. Shinohara, T. Tsubaki // *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*. — 1959. — Vol. VII. — No. 25. — P. 15–45.
- Simons D. B. and Richardson E. V. (1962). Resistance to flow in alluvial channels. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*. 86. 73–99.
DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000716.
- Simons, D. B., E. V. Richardson and C. F. Nordin, Jr. Bedload equation for ripples and dunes. USGS professional paper 462-H. Washington: US GPO, 1965. DOI: 10.3133/pp462H
- Snishchenko B.F., Kopaliani Z.D. On the speed of bedform movement in rivers and laboratory conditions // *Trudy GGI*. 1978. Issue 252. P. 20–37 (in Russ.)
- Swart D.H. Predictive equations regarding coastal transport / D. H. Swart // *Proceedings of the Fifteenth Conference on Coastal Engineering*. — American Society of Civil Engineers, 1976. — Vol. II. — P. 1113–1132. DOI: 10.1061/9780872620834.066.
- Van Rijn L.C. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness / L. C. Van Rijn // *Journal of hydraulic engineering*. — 1984. — Vol. 110. — No. 12. — P. 1733–1754.
DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733).
- Yalin M.S. Mechanics of sediment transport. — Pergamon Press. — 1972. — 290 p.
- Wu S. Riverbed dune morphology of the Lowermost Mississippi River—Implications of leeside slope, flow resistance and bedload transport in a large alluvial river / S. Wu, Y. J. Xu, B. Wang, H. Cheng // *Geomorphology*. — 2021. — Vol. 385, — 107733.
- Zamyshlyaev, V.I. Relationships between river dune parameters when approximating their longitudinal profile by a triangle // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 16.2 (2024): xx–xx. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-236-250 (in Russ.)
- Znamenskaya N.S. Bedform sediment transport. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1968. 188 p. (in Russ.)

ABOUT THE AUTHOR

Zamyshlyaev Vitaly Ivanovich, FSBI «State Hydrological Institute». Candidate of technical sciences (PhD), Senior Researcher at the Department of Channel Processes

Office address: 199004, Russian Federation, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23

E-mail: viza51@mail.ru

+7 921 967-1369

УДК 551.4.04.06.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И МОРФОДИНАМИКА РУСЛА ПУРА И РЕК ЕГО БАССЕЙНА: КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ГЕОГРАФИЯ

Р.С. Чалов, Е.Р. Чалова, А.А. Куракова, Г.Б. Голубцов

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

rschalov@mail.ru

Поступила в редакцию 13.09.2025

После доработки 21.12.2025

Принята к публикации 03.02.2026

Аннотация. В статье впервые на основе литературных данных, картографических материалов, анализа космических снимков и натурных изысканий дана комплексная характеристика руслового режима Пура и его притоков с одновременным их картографическим представлением. На карте бассейна Пура показаны морфодинамические типы русла, состав руслообразующих наносов, размывы берегов как отражение горизонтальных русловых деформаций, наличие перекатов, ширина и затопляемость поймы, развитие пойменной многорукавности и иные параметры на фоне геолого-геоморфологических и гидрологических природных условий. Бассейн Пура характеризуется высокой водоносностью, широкопойменными руслами и песчаным составом руслообразующих наносов, обуславливающим высокий сток влекомых наносов и формирование песчаных отмелей. Особенности формирования и деформации русел, включая процессы спрямления, разветвления, образование побочней и осерёдков, рассмотрены по основным рекам бассейна: Пуре, Пякупуре, Айвасадапуре и их притокам. В работе впервые дана комплексная морфологическая и динамическая характеристика русла Пура, включая дельтовую область, с учетом влияния вечной мерзлоты и специфики устьевых процессов. Полученные результаты имеют практическое значение при освоении северных территорий, планировании водохозяйственных мероприятий и развитии судоходства, особенно в контексте освоения Арктической зоны России.

Ключевые слова: русловые процессы, картографирование, типы русла, размыв берегов, побочни

DOI: 10.71367/3034-4638-2026-2-2-66-78

ВВЕДЕНИЕ

Русловые процессы — природные явления, связанные с работой речных водных потоков, переносящих наносы, с их взаимодействием с грунтами, слагающими ложе рек, и отличающиеся чрезвычайной сложностью и многообразием проявлений из-за различий в водоносности рек, литологии грунтов и рельефа территории, многолетнего и внутригодового режима речного стока, неодинакового и постоянно меняющегося объема стока, состава и условий переноса наносов. Это определяет изменчивость руслового режима рек по их длине, в пределах речных бассейнов и их частей в зависимости от различных сочетаний факторов русловых процессов. Однако при всем многообразии изученности русловых процессов, иногда даже

очень высокая, ограничивается отдельными реками, как правило, теми, которые широко используются в водном хозяйстве или являются важными водными путями сообщения. Но и даже в этих случаях изученность ограничивается конкретными реками или, что чаще, их участками. Вместе с тем оценки русловых процессов на реках в пределах бассейнов или регионов с преобладанием малых рек очень редки и обычно сводятся к самым общим представлениям или рассматриваются под определенным углом зрения, зависящим от конкретных практических задач.

Поэтому становится понятным всё возрастающее за последние десятилетия внимание к оценке русловых процессов на всей или большей части протяженности рек и к их характеристике в преде-

лах речных бассейнов или регионов. Один из приемов такого подхода к изучению географии русловых процессов связан с составлением специальных карт, где отражаются их основные факторы, морфология и динамика русел, их морфодинамические разновидности, другие показатели и параметры, характеризующие эти данные процессы. Помимо карт или наряду с ними появились в литературе подробные описания руслового режима ряда больших и крупнейших рек (Лены, Оби, Иртыша, Северной Двины, Печоры) или их отдельных участков (нижней Волги и др.). Но бассейновая оценка русловых процессов была осуществлена только в монографии «Русловой режим рек Северной Евразии» (1994), в которой впервые (по материалам исследований на уровне 1980-х гг.) были охарактеризованы морфология и динамика русел по бассейнам рек этой огромной территории.

За последние 30–40 лет были выполнены крупные исследования русловых процессов на многих реках России, в том числе тех, по которым сведения о данных процессах или вообще отсутствовали, или были весьма ограничены. Кроме того, применение новейших методов исследований, массовое использование космических снимков привели к существенному расширению возможностей изучения рек, создали не только благоприятные условия для проведения исследований, но и обеспечили получение обширных новых сведений о русловых процессах. Это дало возможность приступить на современном этапе к региональной и бассейновой комплексной оценке русловых процессов. Первый опыт таких обобщений был сделан в основном для малых рек двух слабоосвоенных регионов — Ямала и Гыданского полуострова, для которых впервые были составлены карты русловых процессов, дана оценка факторов и условий формирования русел и полноценная характеристика их руслового режима (Чалов, Чалова, 2024; Голубцов, Чалова, 2025), и для территории Крыма, который при общей хорошей гидрологической изученности и мощном антропогенном вмешательстве в отношении русловых процессов освещен очень слабо (Чалова, Чалов, 2025).

В настоящей статье рассматриваются русловые процессы на реках бассейна р. Пур, в том числе на основе составленной карты. Река Пур с этой точки зрения исследована только в устьевой области, в основном в дельте и на устьевых барах при впадении в Тазовскую губу (Коротаев, Лодина и др., 1976). Хотя, поскольку река в нижнем течении судоходна, на нее составлялись службой пути на речном флоте карты русел (лоцманские) и проводились съемки и промеры перекатов, которые, однако, использова-

лись исключительно для производственных целей. Приводимые в статье материалы, по существу, являются первой характеристикой русловых процессов на р. Пур и реках ее бассейна.

КАРТА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И МЕТОДИКА ЕЕ СОСТАВЛЕНИЯ

Картографический метод исследования русловых процессов (Беркович, Кирик и др., 1986; Чалов, Чернов, 2000, 2004), разработанный во второй половине XX в. и с тех пор применяемый при создании как мелкомасштабных многолистных настенных карт, так и карт бассейнов отдельных рек или ограниченных территорий для региональных атласов, продолжает развиваться и с успехом применяется в картографических работах и при русловых исследованиях для решения различных научных и прикладных задач. Начиная с 1990-х гг. и до настоящего времени наряду с картами на всю территорию бывшего СССР и его европейскую часть в масштабах 1:4000000, 1:2000000 (Русловые процессы на реках СССР, 1990; Морфология и динамика ..., 1999) и 1:1500000 для «Национального атласа России» (2007) были составлены и изданы карты на отдельные регионы, некоторые бассейны рек или их части, в том числе в региональных атласах (горного и степного Алтая, Удмуртии, полуостровов Ямал, Гыданского и Крыма, Оби в пределах ХМАО-Югры и ЯНАО, Селенги (Русловые процессы на реках Алтайского края, 1990; Атлас Ханты-Мансийского ..., 2005; Рысин, 2020; Эколого-географический ..., 2019; Чалов, Чалова, 2024; Голубцов, Чалова, 2025; Опасные ..., 2025)). При этом картографический метод исследований (Берлянт, 1978) применительно к русловым процессам был разработан в рамках научной школы в МГУ имени М.В. Ломоносова и продолжает развиваться в основном в нашей стране. Близкий подход к картографированию русловых процессов был применен в Китае, где созданы атласы бассейнов рек Янцзы и Хуанхэ (Атлас ..., 1989, 1999), в которых собственно единых карт нет, но приведены несколько отдельных карт, отражающих различные аспекты русловых процессов с учетом определенной специфики, связанной с особенностями проявления русловых процессов на реках в иных, чем российские, климатических и природных условиях.

На основе накопленного за предыдущие десятилетия опыта по разработке содержания и картографического представления русловых процессов составлена соответствующая карта бассейна р. Пур (рис. 1). Карта создана в масштабе 1:200 000, что позволяет разместить ее на листе формата А4.

Бассейн р. ПУРА

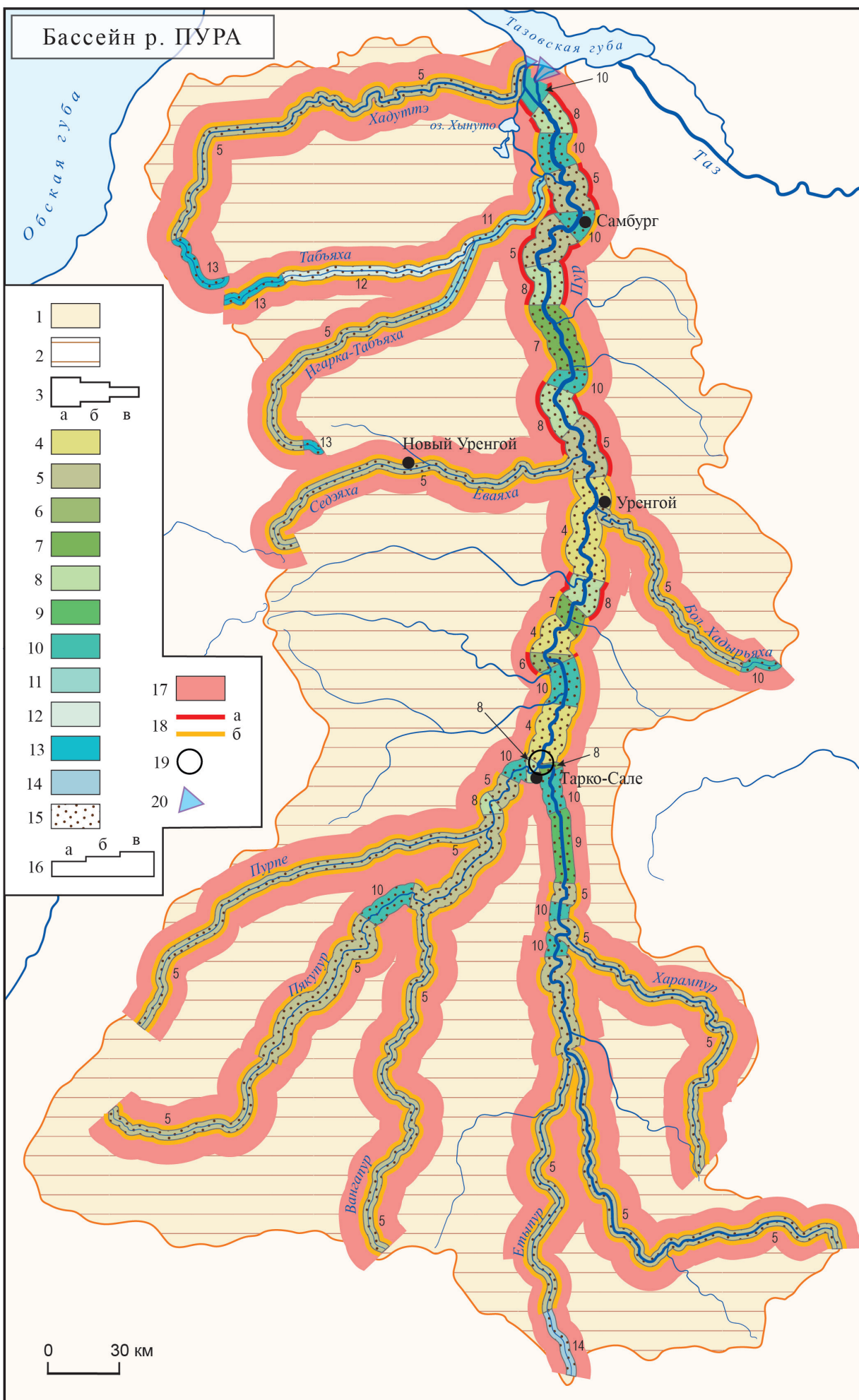


Рис. 1. Карта русловых процессов на реках бассейна р. Пур. Районы: 1 — свободного развития русловых деформаций (абсолютное преобладание широкопойменных русел); 2 — равнинных рек; 3 — ширина русел рек: a — 0.3–0.6 км, b — 0.1–0.3 км, c — менее 0.1 км. Морфологически однородные участки русел: широкопойменные и адаптированные русла: 4 — пологие и развитые сегментные излучины (продольное смещение), 5 — сегментные крутые, петлеобразные, синусоидальные и пальцеобразные излучины (поперечное и продольно-поперечное смещение), 6 — разветвленно-извилистые русла и чередующиеся односторонние разветвления, образованные группами островов, 7 — одиночные, сопряженные, одно- и двусторонние разветвления, чередующиеся (образованные одиночными островами) разветвления, 8 — пойменно-русловые разветвления, 9 — параллельно-рукавные разветвления, 10 — относительно прямолинейные неразветвленные русла, 11 — прямолинейные русла с осередковыми разветвлениями, 12 — прямолинейные русла побочные; врезанные русла: 13 — врезанные излучины, 14 — относительно прямолинейное неразветвленное русло. Руслообразующие наносы: 15 — песчаные. Пойма: 16 — относительная ширина поймы B_n/b_p : a — 3–10, b — 10–20, c — более 20; 17 — регулярно затопляемая пойма. 18 — средние скорости размыва берегов, м/год: a — более 2, b — менее 2; 19 — переменный подпор в узле слияния рек; 20 — дельты

Fig. 1. Map of channel processes on rivers in the Pur River basin. Regions: 1 — free development of channel deformations (absolute predominance of wide floodplain channels); 2 — flat rivers. 3 — Width of river channels: a — 0.3–0.6 km, b — 0.1–0.3 km, c — less than 0.1 km. Morphologically homogeneous sections of channels: wide-floodplain and adapted channels: 4 — gentle and developed segmental bends (longitudinal displacement), 5 — segmental steep, loop-shaped, sinusoidal and finger-shaped bends (transverse and longitudinal-transverse displacement), 6 — branched-meandering channels and alternating one-sided branches formed by groups of islands, 7 — single, conjugate, one- and two-sided branches, alternating (formed by single islands) branches, 8 — floodplain-channel branches, 9 — parallel-branching branches, 10 — relatively straight unbranched channels, 11 — straight channels with middle branches, 12 — straight side channels; incised channels: 13 — incised meanders, 14 — relatively straight unbranched channels. Channel-forming sediments: 15 — sandy. Floodplain: 16 — relative floodplain width B_n/b_p : a — 3–10, b — 10–20, c — more than 20; 17 — regularly flooded floodplain. 18 — average rates of bank erosion, m/year: a — more than 2, b — less than 2. 19 — variable backwater at the confluence of rivers. 20 — deltas

Поскольку современные средства представления изображения позволяют легко варьировать физическим размером карты, ее масштаб дан в линейном виде.

Картографирование русловых процессов, как и других природных явлений, в соответствии с выработанными в картографии методами, позволяющими выразить суть явлений, определяет возможность отобразить на карте не просто распространение картографируемого объекта и его характеристик, но и их изменения во взаимосвязи с изменениями окружающих природных условий. Карта русловых процессов обеспечивает получение полной информации о распространении в бассейне морфодинамических типов и других показателей, характеризующих речные русла (состав руслообразующих наносов, размывы берегов как отражение горизонтальных русловых деформаций, наличие перекатов и т. д.), о ширине и затопляемости поймы, развитии пойменной многорукавности и иных параметрах на фоне геолого-геоморфологических и гидрологических природных условий. Для этого используется целый ряд картографических условных обозначений, как разработанных ранее, так и скорректированных и дополненных применительно к конкретному объекту.

Основное тематическое содержание карты — морфодинамические типы речных русел, для пред-

ставления которых использован линейный знак в виде цветной полосы вдоль топографического изображения реки. Цвет полосы на каждом конкретном участке соответствует определенному здесь типу русла, а ее толщина показывает ширину русла реки по установленной шкале. Оба параметра определялись на основе совокупного анализа ранее созданных русловых карт (Русловые процессы на реках СССР, 1990), карт русел (лоцманских карт) и космических снимков. Количество типов русла Пур невелико, однако на сравнительно узкой полосе (от 0.6 до 0.2 см) цвета не всегда хорошо различимы глазом, поэтому они сопровождаются цифровыми индексами. Поверх цветной полосы русла мелким крапом показаны руслоформирующие наносы, в данном случае — песчаные (Русловые процессы на реках СССР, 1990; Русловой режим ..., 1994), а специальной штриховкой — распространенность или встречаемость перекатов, что также было определено на основе анализа карт русел, натурных наблюдений и литературных данных (Русловые процессы на реках СССР, 1990; Русловой режим ..., 1994).

Вдоль русла тонкой яркой линией показаны скорости размыва берегов. Красный цвет линии отмечает берега со скоростями размыва более 2 м/год, желтый цвет — менее 2 м/год. Определение размы-

вов берегов проводилось на основе сопоставления положения береговой линии по оцифрованным космическим снимкам разных лет: рассматривались спутниковые снимки системы Landsat-5 и Sentinel-2 за периоды 1980-х и 2020-х гг.

Параллельно полосе речного русла также цветной полосой показана пойма. Ширина этой полосы отражает соотношение ширины поймы и русла — B_n/b_p , а цвет обозначает условия затопляемости поймы (на Пуре и реках его бассейна затопление пойм регулярное) (Русловые процессы на реках СССР, 1990). Штриховкой на полосе поймы показана пойменная многорукавность, т. е. расчлененность поймы относительно маловодными пойменными протоками.

Районирование территории бассейна служит фоном основного тематического содержания карты. По геолого-геоморфологическим условиям это — районы свободного развития русловых деформаций, показанные на карте единым цветовым фоном и охватывающие всю территорию бассейна. По гидравлическим условиям формирования русел все реки бассейна относятся к равнинным, поэтому вся территория также показана одним типом изображения, в данном случае — штриховкой. Такой подход дает возможность сопоставлять и сравнивать условия проявления русловых процессов с таковыми на реках соседних бассейнов и регионов, т. е. примененная система условных обозначений является частью общей легенды, составленной для разработки карт Северной Евразии, в пределах которой русловые процессы развиваются в самых разных природных условиях.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЕЛ

Пур — одна из двух больших рек севера Западно-Сибирской низменности, впадающих в южную часть Тазовской губы. Начинается от слияния рек Пякупур и Айваседапур, истоки которых находятся на Сибирских Увалах, его длина 389 км, а вместе с левой его составляющей Пякупуром — 1024 км (Реки и озёра..., 2012). Вместе с правой составляющей р. Айваседапур он имеет субмеридиональное направление течения и бассейн, вытянутый с юга на север при ширине, изменяющейся от 290 км в верхней части до 135 км в створе слияния Пякупура и Айваседапура (п. Тарко-Сале) и далее вплоть до устья колеблющейся в пределах 160–220 км. На всем протяжении Пур, Пякупур и Айваседапур принимают большое количество притоков, стекающих с Сибирских Увалов и водораздельных возвы-

шенностей с бассейном р. Надым на западе и р. Таз на востоке, относящихся в основном к категории малых рек. Формирование стока рек в условиях повышенной увлажненности севера Западной Сибири и сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов обеспечивает их высокую водоносность: среднегодовой расход $Q_{ср}$ р. Пур перед устьем равен 1040 м³/с (годовой сток 27.8 км³, колеблясь от 21.9 км³ в маловодные годы до 33.4 км³ в многоводные (Коротаев, Лодина и др., 1976)), р. Пякупур — $Q_{ср} = 298$ м³/с, р. Айваседапур — $Q_{ср} = 260$ м³/с. Ниже слияния последних стоков Пура увеличивается на расстоянии всего 300 км более чем в полтора раза, причем только в пределах устьевой области (86 км) возрастает на 4.5 км³; и среднегодовой сток реки в устьевом створе составляет 32.3 км³ (Иванов, Осипова, 1972).

Водный режим р. Пур характеризуется весенним половодьем, приходящимся на летние месяцы, когда проходит от 53 до 70% годового стока. Спад половодья нарушается дождевыми паводками и растягивается до начала августа. Ледостав на реках бассейна продолжается около 8 месяцев. Устанавливаясь при низких уровнях, он обуславливает промерзание рек на прирусловых отмелях и мелководных участках, а на Пуре — на перекатах почти по всему поперечному сечению русла. Благодаря этому в руслах многолетнемерзлых грунтов занимают от 47 до 62% их площади (Русловой режим ..., 1994).

Сибирские Увалы, в пределах которых располагаются истоки Пякупура и Айваседапура, а также их притоки, сложены преимущественно песчаными водно-ледниковыми и ледниково-морскими отложениями. Основная часть бассейна находится на морской и ледниково-морской террасированной песчаной равнине. Это обуславливает повсеместное формирование русла Пура и его притоков в условиях свободного развития русловых деформаций, песчаный состав руслообразующих наносов и высокую долю стока влекомых наносов (на Пуре она составляет 61% от общей величины стока наносов (Тананаев, 2014)). Это определяет широкое распространение на большинстве рек бассейна обширных песчаных прирусловых отмелей, обсыхающих в межень, по своей ширине иногда в 2–3 раза превышающих ширину меженного русла (рис. 2) и являющихся побочными перекатов. Малые глубины на перекатах являются лимитирующим фактором на судоходном Пуре и препятствуют использованию других рек в качестве водных путей.

В зимнюю межень на Пуре и его притоках происходит развевание прирусловых отмелей и образование дюн на пойменных берегах. Наиболее

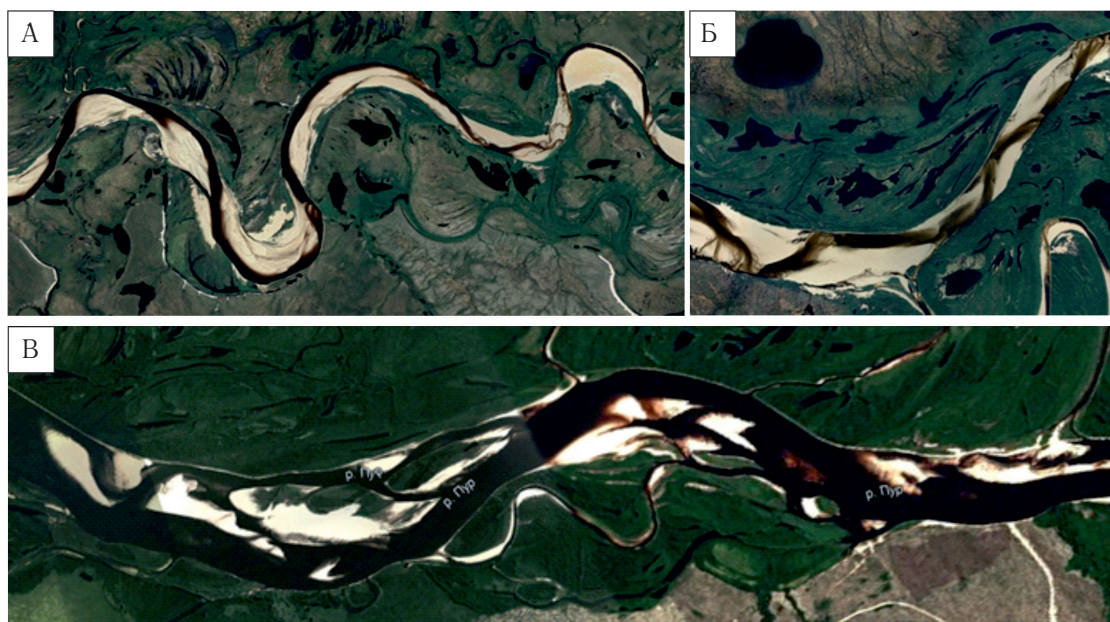


Рис. 2. Прирусловые отмели на реках бассейна Пура: А — осередковые разветвления в прямолинейном русле р. Архатобяха; Б — побочные излучины на р. Табьяхе; В — крупные побочни на р. Пур (космоснимки)

Fig. 2. Channel shoals on rivers in the Pur basin: А — central bifurcations in the straight channel of the Arkhatobyakh River; Б — side channel bends on the Tabyakh River; В — large side channels on the Pur River (satellite images)

крупные отмечены в районе вершины дельты Пура. На водосборе пески, развеваемые при нарушении дерново-растительного покрова в местах разведки и эксплуатации нефтяных месторождений, попадая в русла малых рек, способствуют их обмелению.

Свободные условия развития русловых деформаций определяют распространение на всех реках широкопойменных русел, у которых соотношение ширины поймы B_p и русла b_p почти повсеместно $B_p/b_p > 10-20$. Все реки, кроме, собственно, Пура, на всем протяжении меандрируют, образуя крутые сегментные и петлеобразные излучины, спрямляющиеся благодаря встречному размыву берегов на крыльях последних. Это происходит несмотря на прохождение руслоформирующих расходов при затопленной пойме (Русловой режим ..., 1994) и объясняется ее сплошной залесенностью и вследствие этого очень незначительными скоростями пойменных потоков. С этим же связано отсутствие на реках, кроме Пура, пойменной многоорукавности. В отличие от притоков, Пякупура и Айвасадапура, на Пуре излучины в основном являются пологими и развитыми, часто встречаются разветвления, в основном одиночные и односторонние, реже пойменно-русловые, а также повсеместно в нижнем течении вплоть до впадения в Тазовскую губу распространена пойменная многоорукавность, расчленяющая пойму на отдельные массивы. С наличием вечной мерзлоты на пойме и в русле

реки связаны невысокие темпы горизонтальных русловых деформаций, проявляющихся в размывах берегов со скоростью 2–3 м/год (максимальная отмечена на Пуре — около 7 м/год), и сравнительно малая изменчивость во времени конфигурации русловых форм (излучин, разветвлений).

Все реки бассейна характеризуются незначительностью или отсутствием антропогенного воздействия на русло. Лишь в нижнем течении Пура для обеспечения гарантированных глубин по трассе судового хода проводились до 90-х гг. XX в. дноуглубительные работы в объеме до 40 тыс. м³/год, на устьевом баре до 60 тыс. м³/год (Русловой режим ..., 1994).

МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА РУСЕЛ ОСНОВНЫХ РЕК

Пур — главная река бассейна, имея повсеместно широкопойменное русло, характеризуется увеличением ширины поймы вниз по течению от слияния Пякупура и Айвасадапура; ниже слияний ширина поймы в среднем около 7 км, выше устья р. Табьяхи (п. Самбург) — 18 км и на приустьевом участке — 24 км. Пойма ежегодно затопляется во время половодий, когда уровни воды в реке поднимаются над меженными от 5 до 6.18 м (Русловой режим ..., 1994) (максимум), приводя к растеканию потока и снижению удельной составляющей его русловой

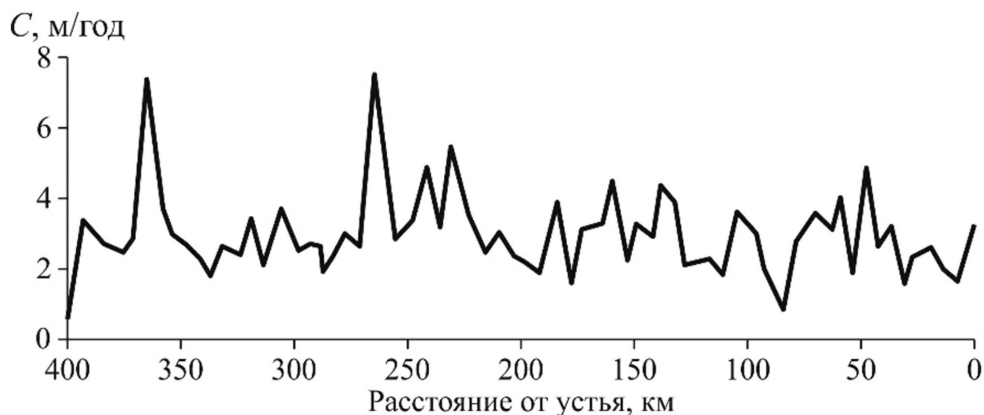


Рис. 3. Изменчивость скоростей размыва берегов (C , м/год) по длине р. Пур

Fig. 3. Variability of bank erosion rates (C , m/year) along the length of the Pur River

части. Ширина русла при этом изменяется мало, колеблясь в пределах 0.5–1.2 км в зависимости от типа русла.

По всей длине р. Пур до вершины дельты чередуются 17 морфологически однородных участков, характеризующихся шестью морфодинамическими типами русла: по три участка представлены крутыми сегментными излучинами, пологими и развитыми излучинами, пойменно-русловыми разветвлениями с извилистыми рукавами и разветвленно-извилистым и прямолинейным неразветвленным руслом, сформировавшимся вдоль ведущего коренного берега, два участка — одиночными и односторонними разветвлениями. Крутые и пологие сегментные излучины ($l/L = 1.7\text{--}2.0$), в том числе в рукавах пойменно-русловых разветвлений, в основном имеют радиусы кривизны в пределах $r = 2.0\text{--}3.1$ км; на наиболее протяженном участке в среднем течении (в районе п. Уренгоя) в серии из пяти излучин в качестве единичных форм среди других встречаются большие с $r = 4.9\text{--}7.3$ км при стреле прогиба $h_n = 1.9\text{--}2.6$ км. В пойменно-русловых разветвлениях рукава образуют, как правило, несколько пологих и развитых, реже крутых излучин (от 2 до 8 на разных участках) с радиусами кривизны $r = 0.5\text{--}2.7$ км.

Одиночные, односторонние и пойменно-русловые (последние протяженностью 10–20 км) разветвления, а также разветвленно-извилистое русло занимают 14.5% длины р. Пур. Кроме того, как формы 2–3-го порядков, острова часто осложняют крылья излучин, особенно больших, привершинные их части, или формируются в рукавах пойменно-русловых разветвлений. В результате в совокупности все разновидности разветвлений встречаются на 68% длины реки (не считая дельтовых разветвлений). При этом протяженность участков реки с разветвлениями и встречаемость островов на излучинах возрастают вниз по течению.

Интенсивность деформаций русла Пура в среднем невелика, составляя по скорости размыва берегов 1.6–1.8 м/год, изменяясь в зависимости от его формы (прямолинейные, крылья или привершинные части излучин и т. д.) от 0.6 до 5.5 м/год (рис. 3), максимум размывов (7.1–7.3 м/год) наблюдается на прямолинейных участках русла напротив самых крупных побочней, огибая которые, поток размывает пойменные берега (рис. 4).

По изменению скоростей и длине фронта размыва берегов русло Пура разделяется на пять участков (табл. 1), из которых на четырех (от слияния Пякупура и Айваседапура до 80 км от устья) колебания средних скоростей размыва практически постоянные, но на последнем (устьевая область) скорость размыва уменьшается до 1.1 м/год. Большие изменения характерны для максимальных скоростей размыва берегов, которые различаются более чем в 2 раза. То же касается и протяженности фронта размыва берегов: в абсолютных значениях суммарная их длина возрастает вниз по течению и различается почти до трех раз, но в относительных значениях она изменяется в пределах 20–30% береговой линии. На нижнем 80-километровом участке интенсивность и протяженность размыва берегов самые низкие, это следствие расширения поймы, снижения уклонов, рассредоточения стока по пойменным протокам, регулярных нагонных подпоров потока, что влечет за собой снижение воздействия потока на берега.

Незначительность русловых деформаций проявляется также в том, что, во-первых, за исторический период (менее 100 лет), когда осуществлялись съемки русла, на Пуре не зафиксированы спрямления излучин, в наиболее яркой форме отражающие переформирования русла; во-вторых, отсутствуют петлеобразные излучины, хотя в рельефе поймы, имеющей голоценовый возраст, подобные деформации многочисленны. Небольшие темпы русловых деформаций связаны с относительно невысокой

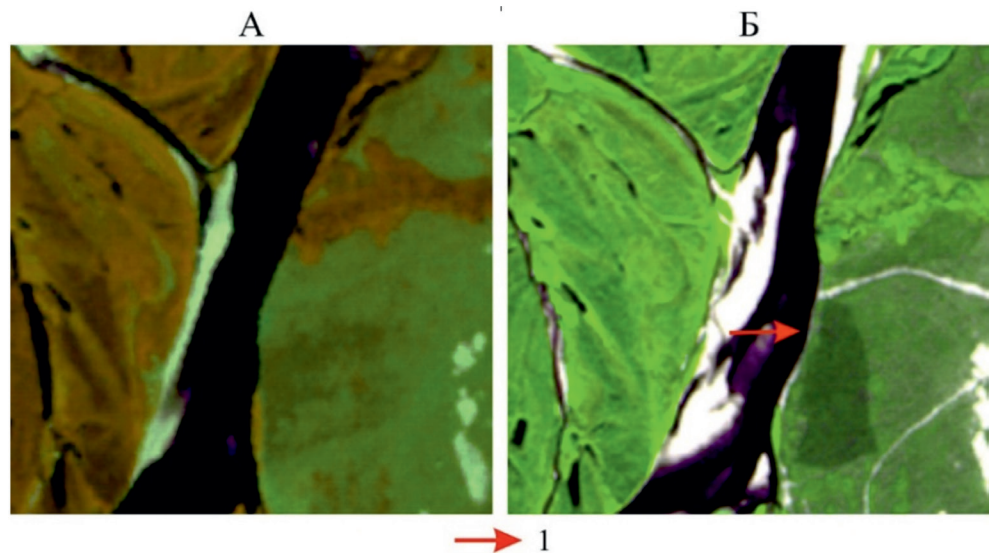


Рис. 4. Размыв пойменного правого берега р. Пур напротив сформировавшегося большого левобережного побочня (космоснимок). А – 1986 г.; Б – 2023 г. 1 – направление смещения русла

Fig. 4. Erosion of the right bank of the Pur River opposite a large left-bank side channel (satellite image). А – 1986; Б – 2023. 1 – direction of channel displacement

степенью развитости излучин, залесённостью поймы и мерзлыми грунтами, слагающими пойменные берега. В то же время на уровне развитых грядовых форм руслового рельефа (побочней, осерёдков) переформирования русла достаточно интенсивны. Благодаря большому стоку песчаных руслообразующих наносов в русле формируются многочисленные побочни, осерёдки и косы, длина которых превышает 900 м, ширина до 150 м при ширине межженного русла при обсохших отмелях в основном около 500 м, лишь местами 1100 м. Побочни смещаются со скоростями 60–80 м/год, в многоводные годы – 150–200 м/год, приводя к периодическому перекрытию ими вогнутых размываемых берегов излучин и частичному размыву выпуклых, что также снижает темпы деформаций самого русла за многолетний период.

Устьевая область р. Пур начинается у п. Самбург (86 км от устья), куда проникают сгонно-нагонные колебания уровней со стороны Тазовской губы (их амплитуда достигает 2.2–3.0 м (Русловой режим ..., 1994). Отсюда и вниз по течению наиболее развитой является пойменная многорукавность; самые крупные пойменные протоки впадают в дельтовые рукава, создавая неопределённость в установлении вершины дельты. Так, левобережная пойменная протока, в начале которой в нее впадает левый приток Пур – р. Табъяха, протекает через оз. Хынута (ниже него протока называется Тоясё) – остаточное образование залива Тазовской губы, существовавшего еще в середине XIX в., и перед впадением в левый рукав современной дельты

Таблица 1. Изменения показателей размыва берегов (скорости C , длина фронта) по длине р. Пур (среднее и нижнее течение)

Table 1. Changes in coastal erosion indicators (velocity C , front length) along the length of the Pur River (middle and lower reaches)

№ участка	Км от устья	Скорости размыва C , м/год		Фронт размыва	
		$C_{\text{ср}}$	$C_{\text{макс}}$	км	% от длины береговой линии
1	390–340	1.8	7.1	27	27.0
2	340–280	1.6	3.3	29	24.1
3	280–190	1.8	7.3	54	30.0
4	190–80	1.7	4.1	45	20.5
5	80–0	1.1	4.5	17	10.6



Рис. 5. Нижние течения рек Пур и Таз и состояние Тазовской губы в середине XIX в.

Fig. 5. Lower reaches of the Pur and Taz rivers and the state of the Tazovskaya Bay in the mid-19th century

принимает последний приток Пура — Хадуттэ (рис. 5). Действительно, на первом картографическом изображении показан залив (Тазовская губа проникала вверх по Пуру, по-видимому, до нынешнего п. Самбурга, и в ней формировалась дельта выполнения). Уже через 100 лет по Пуру заливы по долинам Пура и Таза, а также северная часть губы, куда впадает текущая с Гыданского п-ова р. Мессояха, были заполнены наносами этих рек, сформировалась современная конфигурация Тазовской губы, в суженную южную часть которой со стоковым течением стал впадать Пур. Бывшие дельтовые рукава по мере заполнения залива, выдвижения дельты и превращения его в широкую долину реки трансформировались в пойменные протоки, в том числе впадающие в рукава современной дельты.

Современной вершиной дельты Пура является разделение его русла на дельтовые рукава Большой и Малый Пур. При впадении в Большой Пур пойменной протоки Тоясё от него ответвляется второй основной дельтовый рукав — протока Безымянная, характеризующаяся одиночными разветвлениями и имеющая свое дельтовое разветвление при впадении в Тазовскую губу. Протока Большой Пур имеет на всем протяжении (до и после слияния с Малым Пуrom) прямолинейное неразветвленное русло, образующее, как и

Безымянная протока, свое небольшое дельтовое разветвление из трех рукавов.

Впадение р. Пур в узкую мелководную южную часть Тазовской губы обуславливает своеобразие его уречья. Во время половодья при затопленной пойме ширина разлива в низовьях реки оказывается равной ширине губы, в вершину которой поступает поток из р. Таз. Поэтому расплывания паводковой волны на пике половодья при впадении Пура в губу не происходит. Это же обуславливает развитие в губе постоянного стокового течения, наиболее интенсивного в половодье, когда скорость течения в губе практически выравнивается со скоростью течения в реке (соответственно 1.0 и 1.2 м/с) (Коротаев, Лодина и др., 1976). Гидравлический спад в устье наблюдается лишь при уровнях, соответствующих бровкам пойменных яров, когда течение, выходя из дельтовых рукавов, растекается по акватории губы, вызывая размывы русел рукавов (Коротаев, Лодина и др., 1976).

В настоящее время выдвижения дельты в губу практически не происходит, хотя на взморье формируются устьевые бары, создающие наибольшие затруднения для захода судов из губы в реку. Морской край дельты выравнен с линией южного берега Тазовской губы. Наносы, поступающие из Пура, стоковым течением в губе переносятся в более глубоководные ее части, формируя в ней аккумулятивные образования. Устьевые бары Пура относительно стабильны по положению, но их элементы (бороздины, косы) смещаются влево (на запад), а бороздины постоянно заносятся наносами.

Пякупур — левая (западная) составляющая р. Пур — на всем протяжении, как и на других реках бассейна, имеет широкопойменное, свободно меандрирующее русло, образующее в верхнем и среднем течении петлеобразные и синусоидальные излучины, для которых характерно спрямление благодаря встречному размыву берегов на их крыльях, и крутые сегментные, преобладающие в нижнем течении и при спрямлении превращающиеся в прорванные излучины (рис. 6). Однако последние существуют на протяжении 5–10 лет, постепенно заполняясь наносами; русло спрямленной излучины перекрывается на заходе и выходе побочными и превращается в старицу в прирусловой части поймы. Следы переформирования излучин многочисленны на пойме в виде старичных озер, большинство которых имеют петлеобразную форму. В среднем течении и выше слияния с Айваседапуром имеются два участка прямолинейного русла, сформировавшиеся при спрямлении излучин вдоль коренных берегов, пойменно-русловое разветвление с извилистыми рукавами и передустьем — серия пологих излучин.



Рис. 6. Спрямившаяся в 70-е гг. XX в. крутая сегментная излучина на р. Пякупур (фото Е.Г. Ребреева)

Fig. 6. A steep segmented bend on the Pyakupur River, straightened in the 1970s (photo by E.G. Rebreev)

Все излучины русла сопровождаются образованием широких и протяженных побочней у выпуклых берегов, превышающих ширину меженного русла; на прямолинейных «вставках» между излучинами с $r = 1.3–1.6$ км и на прямолинейных участках побочни располагаются в шахматном порядке, формируя извилистость потока в межень.

Айваседапур — правая составляющая р. Пур — начинается от слияния рек Етындорсы, истоки которой находятся на Сибирских Увалах, и Еркалнадепур с истоками на водоразделе Пура и Таза.

В отличие от других рек бассейна (не считая Пура), Айваседапур характеризуется чередованием крутых сегментных и петлеобразных излучин с прямолинейным руслом, в нижнем течении — параллельно-рукавным разветвлением, образующим протяженный участок длиной около 50 км, а перед устьем — односторонними разветвлениями.

Остальные реки бассейна свободно меандрируют, образуя крутые сегментные и петлеобразные излучины на всем своем протяжении, спрямляющиеся благодаря встречному размыву берегов на их крыльях. Так, средняя скорость размыва пойменных берегов левого притока Пура — р. Еваяхи — составляет 1.6 м/год, максимум достигает более 6 м/год, что сопоставимо с главной рекой. Лишь у р. Етыпур — правый приток р. Етындорсы — в верховьях (от истока около 40 км), расположенных на склонах Сибирских Увалов, русло относительно прямолинейное. Для всех рек характерно формирование крупных побочней, в северной части бассейна создающих побочневый тип русла с извилистым меженным потоком, огибающим побочни, расположенные в шахматном порядке и интенсивно смещающиеся, или осерёдков, создающих осерёдковые разветвления в относительно прямолинейном русле. Наиболее развито такое

побочневое русло на **р. Хадуттэ** — левом притоке Пура, впадающем в его дельтовый рукав. Для него характерны побочни у выпуклых берегов излучин шириной до 280 м при ширине меженного русла при обсохших побочнях — 75–80 м, максимальная ширина побочней у выпуклых берегов излучин до 500 м. На коротких прямолинейных «вставках» между большими излучинами побочни располагаются в шахматном порядке, обуславливая в межень извилистость динамической оси потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составленная карта русловых процессов на реках бассейна Пура и выполненный на ее основе анализ позволили наглядно представить условия формирования речных русел главной реки и ее притоков и выявить особенности и закономерности распространения их морфодинамических типов. При одновременном использовании данных о русловых деформациях, полученных при сопоставлении имеющихся картографических материалов, в первую очередь карт русел (раньше они назывались лоцманскими), зафиксировавших состояние русел на определенные временные срезы, использования аэро- и космических снимков и результатов натурных изысканий — впервые удалось дать комплексную характеристику руслового режима основных рек и обобщенную оценку для малых рек. Выделенные на карте морфологически однородные участки по длине р. Пур, его составляющих — Пякупура и Айваседапура и их притоков с оценкой русловых деформаций дают возможность, помимо новых сведений по географии русловых процессов, на предпроектном уровне получить исходные сведения о русловых процессах, особенностях развития и проявлениях русловых процессов и

планировать выполнение специальных изысканий при проектировании различных водохозяйственных и гидротехнических мероприятий. Актуальность полученных результатов особенно проявляется в связи со все возрастающим вниманием к освоению Арктической зоны и созданию современных водных путей на реках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова 1.13 «Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений» (исходные материалы) при финансовой поддержке РНФ — проект № 23-17-00065 (картографирование русловых процессов, морфодинамика речных русел).

ЛИТЕРАТУРА

Атлас бассейна реки Хуанхэ / Под ред. Вэн Хуаюаня. Пекин; Китайская карта. 1989. 356 с. (на китайском языке).

Атлас бассейна реки Янцзы. Пекин: Китайская карта. 1999. 304 с. (на китайском языке).

Беркович К.М., Кирик О.М., Сваткова Т.Г., Чалов Р.С. Применение картографического метода при исследованиях русловых процессов // География и природные ресурсы. 1986. № 3. С. 99–108.

Берлянт А.М. Картографический метод исследований. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1978. 255 с.

Большой всемирный настольный атлас Маркса / Под ред. Э.Ю. Петри, Ю.М. Шокальского. СПб.: Изд-во А.Ф. Маркса. 1905. 210 л.

Голубцов Г.Б., Чалова Е.Р. Русловые процессы на реках Гыданского полуострова и их картографирование // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2025. Т. 35. Вып. 2. С. 233–240.

Иванов В.В., Осипова И.В. Сток обских вод в море и его многолетняя изменчивость // Тр. ААНИИ. Т. 297. 1972.

Коротаев В.Н., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Шутов А.М. Формирование устьев рек Таза и Пура и рельефа дна южной части Тазовской губы // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 5. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1976. С. 139–173.

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

Морфология и динамика русел рек. Опасность русловых процессов. М-б 1:4000000 // Селенга.

Байкал. Эколого-географический атлас — монография. М. 2019. С. 61, 63.

Опасные экзогенные процессы в Ямало-Ненецком автономном округе. Атлас-монография. М.—Салехард—Тюмень: Экспресс. 2025. 104 с.

Русловой режим рек Северной Евразии / Под ред. Р.С. Чалова. М.: МГУ. 1994. 336 с.

Русловые процессы. М-б 1:15000000. Типы русловых процессов и устойчивость русла. М-б 1:40000000 // Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М.: ГГКО Роскартография. 2007. Л. 127–129.

Русловые процессы на реках. Морфология и динамика русел рек Оби и Иртыша // Атлас Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. Т. II. Природа и экология Ханты-Мансийского АО. Изд-во ХМАО. 2005. Л. 74.

Русловые процессы на реках Алтайского края. М-б 1:1000000. М.: ГУГК СССР. 1990. 1 л.

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

Рысин И.И. Морфодинамические типы русел. Интенсивность горизонтальных русловых деформаций. М-б 1:2000000 // Атлас Удмуртской Республики. М.: Феория; Ижевск: Удмуртия. 2020. 79 л.

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

<https://doi.org/10.35634/2412-9518-2024-34-3-308-314>.

Чалов Р.С., Чернов А.В. Мелкомасштабное картографирование русловых процессов // Геодезия и картография. 2000. № 3. С. 35–43.

Чалова Е.Р., Чалов Р.С. Карта русловых процессов и их антропогенных изменений на реках Крыма // Эрозия почв и русловые процессы. 2025. № 2. С. 8–17.

<https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-2-2-8-17>.

Чалов Р.С., Чернов А.В. Мелкомасштабные карты русловых процессов как метод их региональных исследований // VI Всеросс. гидрол. съезд. Тез. докл. Секция 6. Проблемы русловых процессов, эрозии и наносов. СПб. 2004. С. 12–13.

ОБ АВТОРАХ

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

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

Куракова Анна Александровна: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, н. с. НИЛ эро-

зии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ. a.a.kurakova@mail.ru

Голубцов Георгий Борисович: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук, мл. н. с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ. georgy1995golubcov@yandex.ru

CONDITIONS FOR THE FORMATION AND MORPHODYNAMICS OF THE PUR RIVER AND ITS BASIN: MAPPING AND GEOGRAPHY

R.S. Chalov, E.R. Chalova, A.A. Kurakova, G.B. Golubtsov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

rschalov@mail.ru

Abstract. For the first time, this article provides a comprehensive description of the channel regime of the Pur River and its tributaries, based on literature data, cartographic materials, analysis of satellite images, and field surveys, accompanied by cartographic representations. The map of the Pur basin shows the morphodynamic types of the riverbed, the composition of the riverbed-forming sediments, bank erosion as a reflection of horizontal riverbed deformations, the presence of shoals, the width and floodability of the floodplain, the development of floodplain multi-branching, and other parameters against the background of geological, geomorphological, and hydrological natural conditions. The Pur basin is characterised by high water-bearing capacity, wide floodplain channels and sandy composition of channel-forming sediments, which determines high sediment transport and the formation of sandy shoals. The features of channel formation and deformation, including the processes of straightening, branching, the formation of side channels and pools, are considered for the main rivers of the basin: the Pur, Pyakupur, Aivasedapur and their tributaries. The paper provides the first comprehensive morphological and dynamic characterisation of the Pur riverbeds, including the delta area, taking into account the influence of permafrost and the specifics of estuary processes. The results obtained are of practical importance for the development of northern territories, the planning of water management measures and the development of shipping, especially in the context of the development of Russia's Arctic zone.

Keywords: channel processes, mapping, channel types, bank erosion, sandbank

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out according to the research plans of the Scientific Research Laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University 1.13 "Erosion and river channel systems: hydrological regime, natural and anthropogenic transformations and forecast of dangerous manifestations" (source materials) with the financial support of the Russian Science Foundation — project No. 23-17-00065 (mapping of river channel processes, morphodynamics of river channels).

REFERENCES

Atlas of the Yangtze River Basin. Beijing: China Map. 1999. 304 p. (In Chinese)

Atlas of the Yellow River Basin / Edited by Wen Huayuan. Beijing: China Map. 1989. 356 p. (In Chinese)

Berkovich K.M., Kirik O.M., Svatkova T.G., Chalov R.S. Application of the cartographic method in the study of channel processes // *Geografiya i prirodnye resursy*. 1986. No. 3. P. 99–108. (In Russ.)

Berlyant A.M. Cartographic research method. Moscow: Moscow University Press. 1978. 255 p. (In Russ.)

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

<https://doi.org/10.35634/2412-9518-2024-34-3-308-314>

Chalov R.S., Chernov A.V. Small-scale mapping of channel processes // *Geodeziya i kartografiya*. 2000. No. 3. P. 35–43. (In Russ.)

Chalov R.S., Chernov A.V. Small-scale maps of channel processes as a method for regional studies // VI All-Russian Hydrological Congress. Abstracts. Section 6. Problems of channel processes, erosion

and sedimentation. St. Petersburg. 2004. P. 12–13. (In Russ.)

Chalova E.R., Chalov R.S. Map of channel processes and their changes under human impact on the Crimea rivers // *Eroziya pochv i ruslovyie processy*. 2025. No. 2. P. 8–17. (In Russ.).

<https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-2-2-8-17>

Channel processes on rivers. Morphology and dynamics of the Ob and Irtysh river channels // *Atlas of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra*. Vol. II. Nature and ecology of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Published by the KhMAO. 2005. 74 p. (In Russ.)

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

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

Channel processes. Scale 1:15,000,000. Types of channel processes and channel stability. Scale 1:4,000,000 // *National Atlas of Russia*. Vol. 2. Nature. Ecology. Moscow: GGKO Roskartografiya. 2007. P. 127–129. (In Russ.)

Channel regime of rivers in Northern Eurasia. Edited by R.S. Chalov. Moscow: Moscow State University. 1994. 336 p. (In Russ.)

Golubtsov G.B., Chalova E.R. Channel processes on the rivers of the Gydan Peninsula and their cartography // *Vest. Udmurt. un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*. 2025. Vol. 35. Issue 2. P. 233–240. (In Russ.)

Hazardous exogenous processes in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Atlas-monograph. Moscow-Salekhard-Tyumen. Express Publ. 2025. 104 p. (In Russ.)

Ivanov V.V., Osipova I.V. Ob River runoff into the sea and its long-term variability // *Proceedings of the Arctic and Arctic Research Institute*. Vol. 297. 1972. (In Russ.)

Korotaev V.N., Lodina R.V., Chalov R.S., Shutov A.M. Formation of the mouths of the Taz and Pur rivers and the relief of the bottom of the southern part of the

Tazovsky Gulf // *Eroziya pochv i ruslovyie processy*. Issue 5. Moscow: Moscow University Press. 1976. P. 139–173. (In Russ.)

Large World Table Atlas of Marx. Edited by E.Yu. Petri, Yu.M. Shokalsky. St. Petersburg: A.F. Marx Publishing House. 1905. 210 p. (In Russ.)

Morphology and dynamics of river channels. The danger of channel processes. M-b 1:4000000 // *Selenga. Baikal. Ecological and geographical atlas – monograph*. Moscow. 2019. P. 61, 63. (In Russ.)

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

Rysin I.I. Morphodynamic types of riverbeds. Intensity of horizontal riverbed deformations. Scale 1:2000000 // *Atlas of the Udmurt Republic*. Moscow: Feoria; Izhevsk: Udmurtia. 2020. 79 p. (In Russ.)

ABOUT THE AUTHORS

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

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

Kurakova Anna Alexandrovna. Lomonosov Moscow State University. Candidate of Geographical Sciences. Scientific Researcher of Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes. a.a.kurakova@mail.ru

Golubtsov Georgy Borisovich. Lomonosov Moscow State University. Candidate of Geographical Sciences. Junior Scientific Researcher of Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and River Channel Processes. georgy1995golubcov@yandex.ru

УДК 556.54:551.345:550.834:355.691.31

МЕРЗЛОТНЫЕ УСЛОВИЯ СУДОХОДНОГО БАРОВОГО УЧАСТКА РЕКИ ЯНЫ

А.С. Завадский^{1, 3, *}, А.П. Ермаков², А.М. Пятилова², П.П. Головлев¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет

³Российский университет транспорта

*az200611@rambler.ru

Поступила в редакцию 16.05.2026

После доработки 18.07.2026

Принята к публикации 18.07.2026

Аннотация. Вопросы пространственного распространения и глубины залегания многолетнемерзлых пород на устьевых барах арктических рек РФ изучены достаточно фрагментарно, что объясняется труднодоступностью и сложными гидрологическими условиями для выполнения натурных исследований. К числу малоизученных относится баровый участок р. Яны в устье судовой протоки Главное Русло. Последние успешные исследования мерзлотных условий на баре Яны относятся к началу 70-х гг. XX в., когда были выполнены буровые работы (со льда), позволившие охарактеризовать структуру и температурный режим донных отложений на отдельных участках, включая баровые бороздины, в которых концентрируется речной сток. В 2024 г. был проведен комплекс геофизических исследований, включавший в себя сейсмоакустическое профилирование верхней толщи донных грунтов, направленный на оценку мерзлотных условий в пределах судовой баровой бороздины Заманиха. Одновременно выполнялась заверка результатов профилирования методом мелкомасштабного бурения. В настоящей статье приводятся результаты обобщения архивных материалов и интерпретации данных полевых исследований 2024 г., позволившие актуализировать и уточнить современный фон, определяющий мерзлотные условия на исследованном баровом участке в дельте Яны. С применением ГИС-технологий выполнена визуализация и количественная оценка пространственного и глубинного распространения многолетнемерзлых и сезонно промерзающих грунтов вдоль трассы судового хода.

Ключевые слова: бар р. Яны, сейсмоакустическое профилирование, пространственное распространение сезонной и многолетней мерзлоты, условия судоходства

DOI: 10.71367/3034-4638-2026-2-2-79-97

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к морфодинамике русловых систем, формирующихся в условиях повсеместного или очагового распространения многолетней (вечной) мерзлоты, постоянно растет на фоне отмечаемого многими научными центрами ускорения трендов климатических изменений в арктических регионах (Обзор состояния..., 2024; Изменение климата в Российской Арктике..., 2022; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013). Особое внимание уделяется речным дельтам Северного Ледовитого океана, которые одновременно с деградацией подстилающих их многолетнемерзлых грунтов (ММГ) испытывают влияние повышения уровня Мирового океана и трансформации ледового режима (Моря российской Арктики..., 2021; Impacts of a warming Arctic. ACIA, 2024).

Вопросы влияния условий залегания ММГ и режима сезонного промерзания/оттаивания верхних слоев дельтовых отложений на русловые деформации, формирование и транзит наносов имеют широкое прикладное значение, в том числе для обеспечения судоходства на границе «река—море». Многие исследователи (Григорьев, 1966; Бутаков, 1972; Нижняя Яна..., 1998; Коротаев, 2024; Lauzon et al., 2019) отмечают стабилизирующую роль ММГ в плановых переформированиях баровых бороздин речных дельт, что, с одной стороны, повышает устойчивость судовой трассы. Однако сам факт выхода ММГ в пределах судового хода зачастую выступает в качестве лимитирующего фактора, существенно осложняющего поддержание гарантированных глубин при проведении дноуглубительных работ.

Одним из направлений Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации (Стратегия..., 2020) на период до 2035 г. является комплекс мероприятий по улучшению условий судоходства, в т. ч. оптимизация дноуглубительных работ при поддержании гарантированных габаритов водного пути. В бассейне Яны, где реки зачастую на безальтернативной основе обеспечивают транспортную доступность отдельных территорий, в ближайшее десятилетие предусмотрено строительство целого ряда промышленных объектов, связанных с развитием минерально-сырьевой базы полезных ископаемых, в том числе золоторудного месторождения Кючус, месторождения серебра «Прогноз», Депутатского оловорудного месторождения, месторождения олова Тирехтях. Важной энергетической составляющей развития региона является строительство атомной станции малой мощности в пос. Усть-Куйга Усть-Янского района, также требующее надежного водотранспортного обеспечения на всем протяжении навигационного периода.

Основные затруднения для судоходства в нижнем течении Яны связаны с преодолением мелководного бара в устье протоки Главное Русло. Наличие лимитирующих (по глубине) участков, наряду с происходящими русловыми переформированиями, изменяющими плановое положение баровых бороздин, существенно осложняет поддержание гарантированных габаритов судового хода и требует значительных объемов дноуглубления. Существенным ограничением его проведения являются локальные выходы линз сезонной и многолетней мерзлоты. В 2024 г. был проведен комплекс инженерных изысканий, направленных на получение представления о пространственном распространении многолетнемерзлых грунтов в пределах наиболее затруднительного для судоходства участка бара Яны, протяженностью 11 км, а также информации о рельефе русла и составе донных отложений. Исследования позволили обнаружить и оконтурить линзы мерзлых пород в плане и на глубину залегания, что в дальнейшем легло в основу разработки рекомендаций по оптимизации положения трассы судового хода и снижению объемов разработки многолетнемерзлых грунтов в пределах основной судоходной бороздины Заманиха.

Объект исследования

Объектом исследования является расположенный на северном внешнем крае дельты Яны

баровый участок (рис. 1), по которому (с дальнейшим заходом в протоку Главное Русло) с середины XX в. осуществляется основной транзит судов, следующих из моря Лаптевых в бассейн Яны и в обратном направлении (до 1953 г. судоходство осуществлялось через баровый участок протоки Правая (Исследования баров..., 1968)). В пределах барового участка исследовалась судоходная бороздина протяженностью 11 км (от –11 до –22 км трассы судового хода*) (рис. 2).

Натурные исследования

Комплекс натурных исследований был проведен с 21 июля по 8 августа 2024 г. в пределах судоходной баровой бороздины Заманиха с захватом «полосы» шириной 500 м и глубиной исследования от поверхности дна не менее 5 м. Для оценки пространственного распространения многолетнемерзлых грунтов была выполнена съемка методом непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП). Метод НСАП основан на излучении акустических импульсов и анализе отраженных сигналов (времени их прихода и амплитуды) с использованием одного источника и одного приемника. Расстояние между ними существенно меньше, чем глубина исследования. Таким образом, можно считать их совмещенными в пространстве. Возбуждение сигналов и их регистрация осуществляются через очень небольшие промежутки времени, формируя фактически непрерывную запись — сейсмоакустический разрез. Наиболее полно теория метода сейсмоакустического профилирования на мелководных акваториях изложена в работах (Калинин и др., 1983; Шалаева и др., 2024).

Съемка осуществлялась с помощью широкополосного морского профилографа «EdgeTech DV-216» (табл. 1, рис. 3), позволяющего сканировать подповерхностные донные слои в мелководных морских, эстуарных или озерных зонах. Профилограф использует технологию «Full Spectrum CHIRP», позволяющую одновременно выполнять батиметрическую и сейсмоакустическую съемку высокого разрешения (в дециметровом масштабе) глубиной до 20 м (при благоприятных геологических и гидрологических условиях).

Сейсмоакустическое профилирование (НСАП) было выполнено по единой системе профилей: основные — через 50–100 м поперек трассы судового хода, секущие (продольные) — через 150–200 м вдоль исследуемого участка. Общий объем сейсмо-

* Здесь и далее километраж приводится по актуализированной на 2024 г. лоцманской карте р. Яны (от места слияния рек Дулгалах и Сартанг до устья).

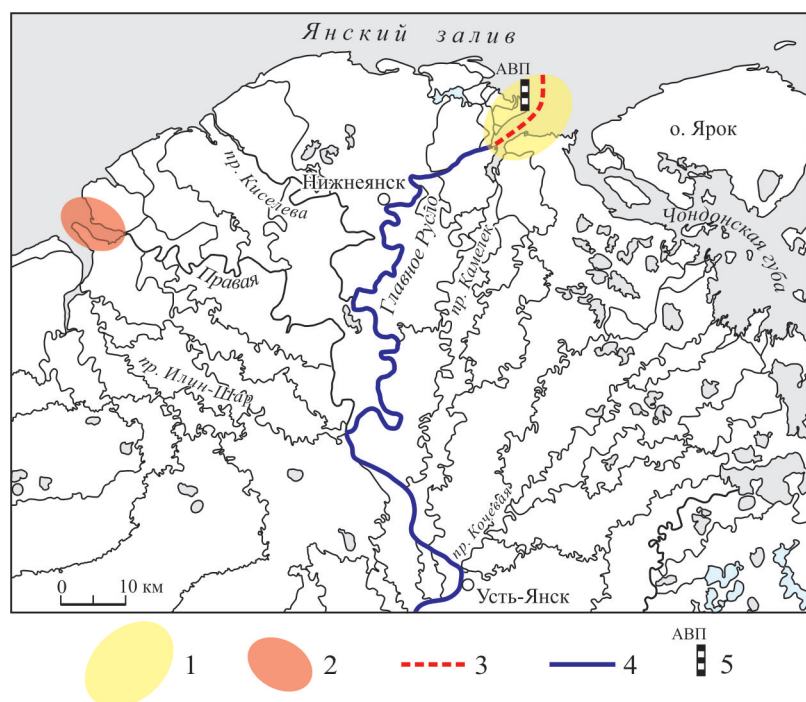


Рис. 1. Схема гидрографической сети дельты Яны от с. Усть-Янск: 1 — исследуемый баровый участок протоки Главная Русло; 2 — баровый участок протоки Правая, судовой до середины XX в.; 3 — современное положение судовой бороздины; 4 — положение трассы судового хода в дельте Яны; 5 — расположение автономного водомерного поста (АВП) «Юэдей»

Fig. 1. Diagram of the hydrographic network of the Yana Delta from Ust-Yansk: 1 — the studied bar section of the Main Channel channel; 2 — the bar section of the Pravaya channel, navigable until the middle of the twentieth century; 3 — the current position of the navigable bar furrow; 4 — the position of the navigation route in the Yana delta; 5 — the location of the autonomous water measuring post (AWP) “Yuedey”

акустического профилирования составил около 100 погонных км. Позиционирование судна, с которого выполнялся комплекс инженерных изысканий, осуществлялось с использованием спутниковой GPS/ГЛОНАСС-навигации.

В районе работ (на –12 км за правой кромкой судовой бороздины) расположен автоматический водомерный пост (АВП) (рис. 2Б, рис. 4), с которого данные об уровне водной поверхности каждые 3 часа передаются по радиоканалу в диспетчерскую воднопутевой службы. В дальнейшем эти данные использовались при камеральной обработке батиметрических и геофизических материалов для приведения всех измерений к единому проектному уровню воды (ПУВ) — +100 см над «0» графика в/п Уэдей.

В полевых условиях была проведена экспресс-обработка материалов НСАП, позволившая наметить точки для натурной (физической) заверки кровли мерзлых пород. Для этих задач использовался мобильный буровой инструмент («бур геолога»), который позволял бурить скважины до 8 м от поверхности воды, а также осуществлять отбор проб донного грунта (с помощью специальной насадки — буровой ложки). Для удержания рабочего судна в точке бурения (заверки) использовался якорь весом 1500 кг, который крепился на буксирной лебедке и отдавался в точке пробоотбора. Всего натурная заверка слоев мерзлых пород (либо их отсутствия) была осуществлена на 35 вертикалях, каждая из которых в дальнейшем была представлена в графической форме в «Альбоме точек «заверки» донных грунтов» (рис. 5).

Одновременно был выполнен отбор 37 проб поверхностных донных отложений, которые в дальнейшем были перевезены в специализированную лабораторию, где методом сухого ситования (по ГОСТ 12536-2014) определен их гранулометрический состав. Состав руслообразующих наносов в поверхностном слое оказался очень однороден с абсолютным преобладанием частиц менее 0.1 мм, что позволяет отнести грунты к илам (алевритам). Только в отдельных случаях (7 проб) преобладали более крупнозернистые фракции, представленные тонкозернистым песком.

Интерпретация данных сейсмоакустического профилирования

Целью интерпретации данных НСАП являлось выделение кровли многолетнемерзлых пород, а также ареалов распространения сезонной мерзлоты и участков немерзлых уплотненных слоев грунта. Интерпретация данных сейсмоакустического профилирования проводилась в программном пакете Kingdom 8.7.

Полевые данные, полученные профилографом «EdgeTech DV-216», представляют собой ансамбли трасс нулевого удаления, записанные в сейсмическом формате SEG-Y в виде огибающей сигнала. Данные сейсмоакустического профилирования по каждому профилю загружались в интерпретационный пакет с привязанными координатами для каждой сеймотрассы. Всего для интерпретации было использовано 143 поперечных и 4 продольных профиля, отобранных после критического анализа

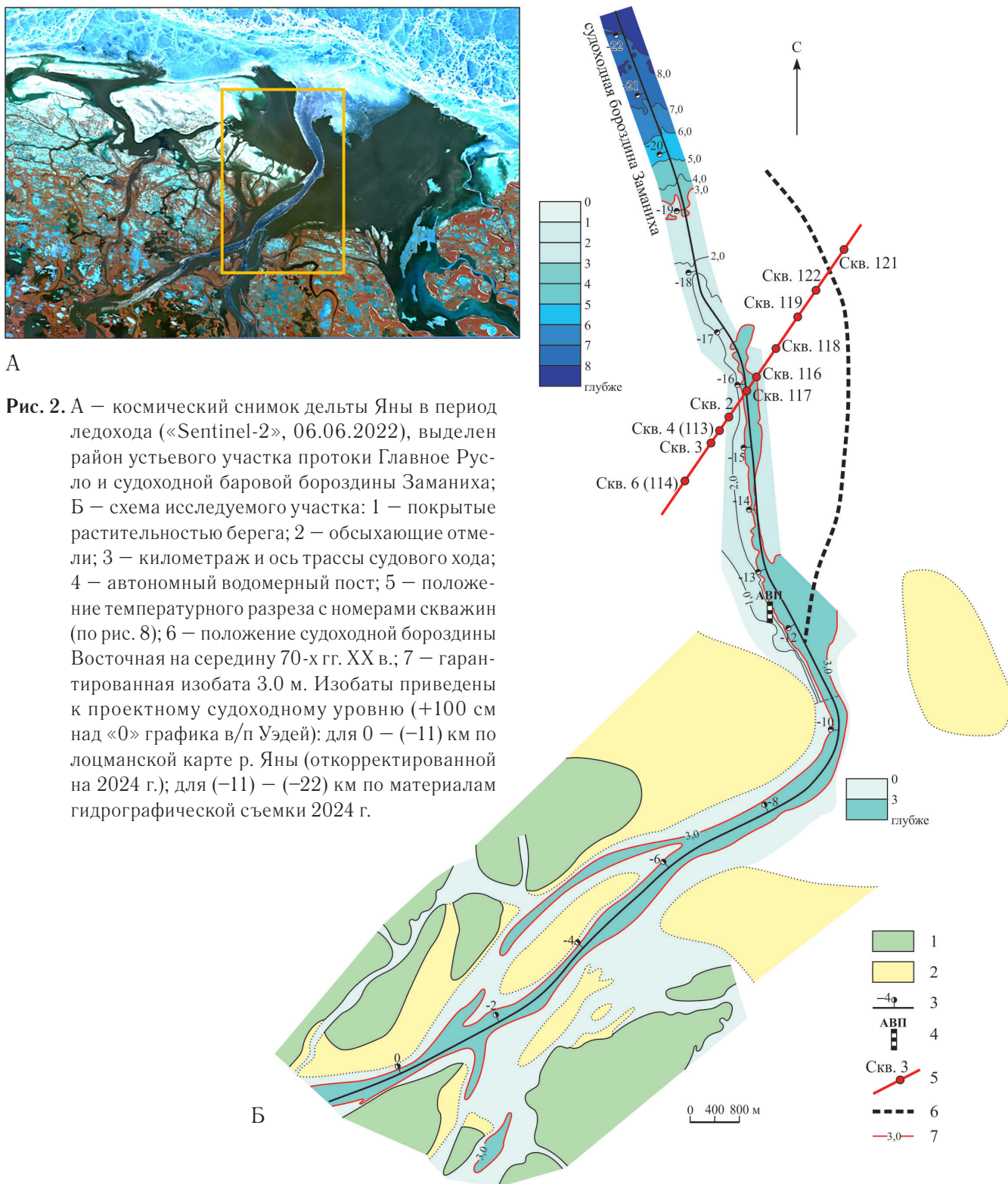
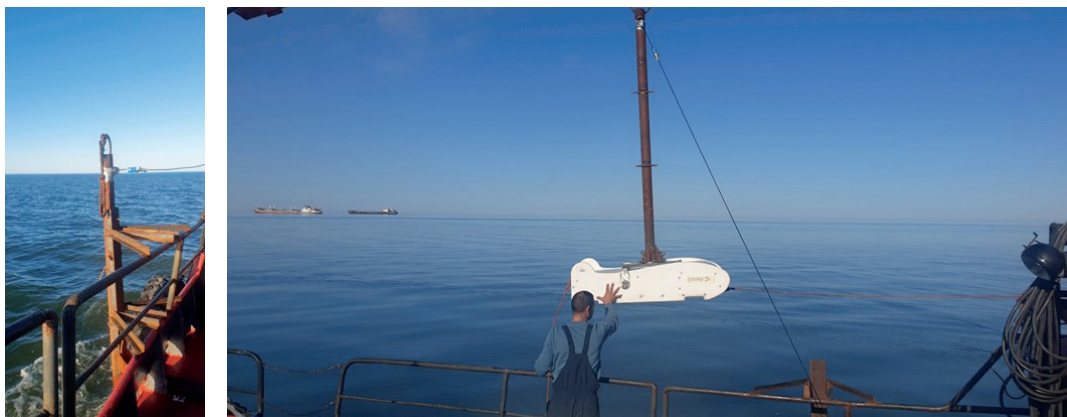


Рис. 2. А — космический снимок дельты Яны в период ледохода («Sentinel-2», 06.06.2022), выделен район устьевое участка протоки Главное Русло и судоходной баровой бороздины Заманиха; Б — схема исследуемого участка: 1 — покрытые растительностью берега; 2 — обсыхающие отмели; 3 — километраж и ось трассы судового хода; 4 — автономный водомерный пост; 5 — положение температурного разреза с номерами скважин (по рис. 8); 6 — положение судоходной бороздины Восточная на середину 70-х гг. XX в.; 7 — гарантированная изобата 3.0 м. Изобаты приведены к проектному судоходному уровню (+100 см над «0» графика в/п Уэдей): для 0 — (–11) км по лоцманской карте р. Яны (откорректированной на 2024 г.); для (–11) — (–22) км по материалам гидрографической съемки 2024 г.

Fig. 2. A is a satellite image of the Yana Delta during the ice break (Sentinel-2, 06.06.2022), the area of the mouth of the Main Channel channel and the navigable Zamanikha furrow is highlighted; B is a diagram of the area under study: 1 — vegetation—covered shores; 2 — drying shoals; 3 — kilometer and axis of the ship's route; 4 — an autonomous water—level post; 5 — the position of the temperature section with well numbers (according to Figure 9); 6 — the position of the navigable Vostochnaya channel in the mid—70s of the XX century; 7 — guaranteed isobate of 3.0 m. The isobaths are given to the design navigable level (+100 cm above the “0” graph of the Udei port): for 0 — (–11) km according to the pilot map of the Yana River (adjusted for 2024); for (–11) — (–22) km according to the 2024 hydrographic survey materials

Таблица 1. Основные технические характеристики морского профилографа «EdgeTech DV-216»**Table 1.** Main technical specifications of the marine profilograph «EdgeTech DV-216»

Диапазон частот	2–16 кГц
Режим модуляции	Импульсный, «CHIRP» в диапазоне 2–16 кГц
Разрешение	10–20 см
Угол расхождения	15–20°

**Рис. 3.** Система забортного крепления и процесс установки профилографа «EdgeTech DV-216» при проведении инженерных изысканий на बारे Яны в 2024 г.**Fig. 3.** Overboard fastening system and installation process of the EdgeTech DV-216 profilograph during engineering surveys on the Yana bar in 2024**Рис. 4.** Автономный водноуровненный пост (АВП), расположенный на –12 км судового хода исследуемого барового участка Яны**Fig. 4.** Autonomous water level post (AWP) located at –12 km of the ship course of the studied bar section of the Yana River

их качества и отбраковки всего массива исходных данных.

Исходные данные НСАП были представлены в виде огибающей сигнала. Поэтому оцифровка границ выделяемых слоев проводилась по резкому изменению интенсивности огибающей сигнала.

Принципиальная возможность применения непрерывного сейсмоакустического профилирования для картирования мерзлых пород определяется существенным контрастом физических свойств между породами, находящимися в талом и в мерзлом состоянии (Рекомендации..., 1987). Мерзлые породы характеризуются повышенными значениями скоростей распространения продольных волн (больше 2500–3000 м/с) относительно немерзлых или обводненных оттаивающихся грунтов сезонной мерзлоты. На сейсмоакустических разрезах это выражается в значительном увеличении амплитуды отраженных сигналов или интенсивности их огибающей, а ниже кровли мерзлых пород отмечается «ослабление» записи вплоть до полного экранирования нижележащей части разреза (Рекант и др., 2009; Niessen, 2004a; Niessen, 2004b).

Наиболее ярко на профилях НСАП представлена граница «вода–дно». Она уверенно выделяется на всех разрезах, кроме периферийных участков зоны обследования с глубинами менее 1 м. Пример оцифровки границы «вода–дно» в программном пакете Kingdom 8.7 представлен на рис. 6 (переход от синего к белому и далее красному цвету соответствует увеличению интенсивности огибающей сейсмического сигнала: синий цвет — интенсивность низкая, красный цвет — интенсивность высокая).

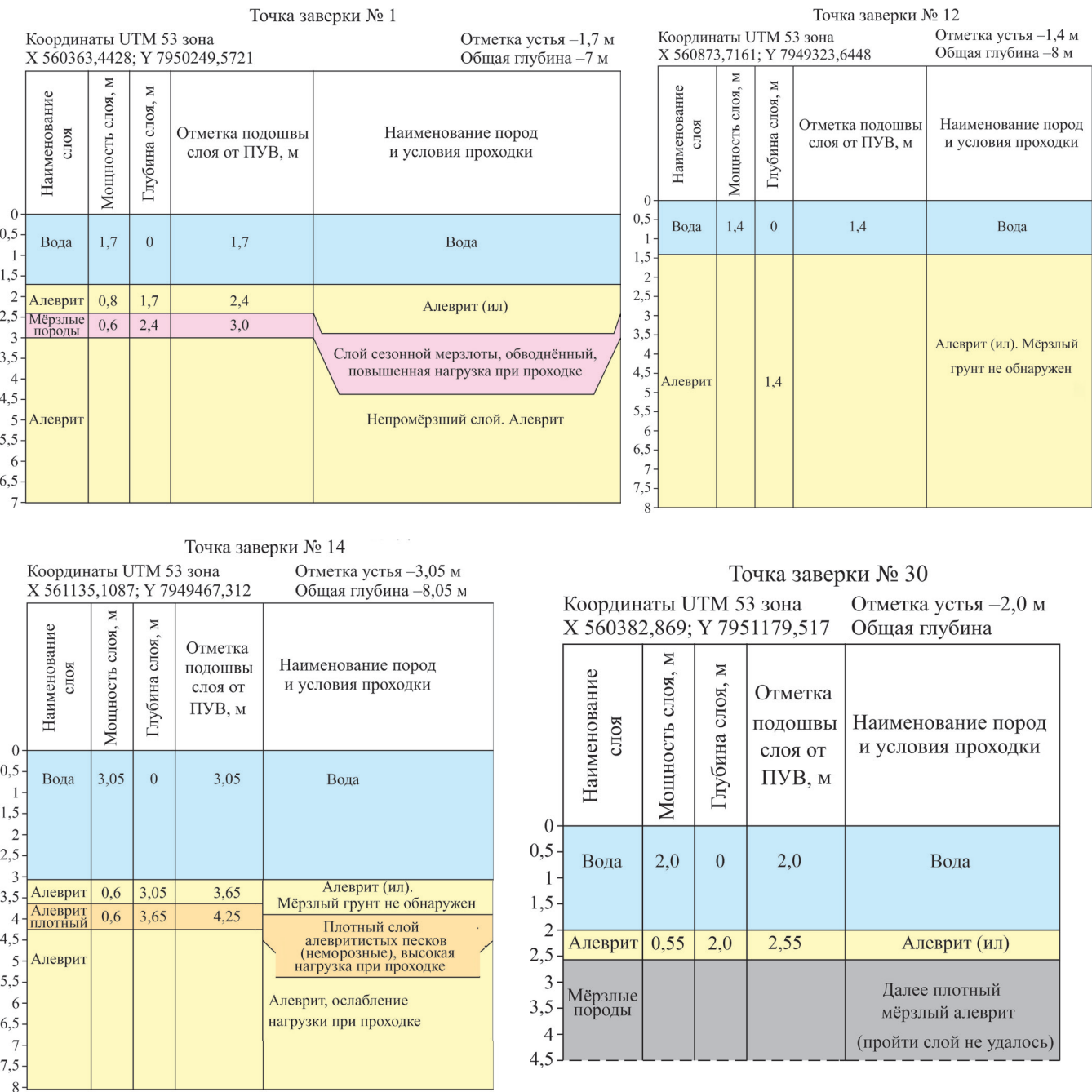


Рис. 5. Типовые формы графического описания скважин заверки (фрагмент «Альбома точек «заверки» донных грунтов»). Глубины приведены к ПУВ (+100 см над «0» графика в/п Уэдей)

Fig. 5. Typical forms of graphical description of well verification (fragment of the “Bottom Soil Verification Points Album”). The depths are given in terms of PUV (+100 cm above the “0” of the Uedey graph)

На разрезах НСАП оцифровывались наиболее интенсивные отражения, соответствующие, предположительно, кровле мерзлых пород. Данная граница прослеживается либо уверенно (рис. 7), либо фрагментарно.

Перевод сейсмических разрезов из временного масштаба в шкалу глубин осуществлялся путем

оценки средней скорости распространения акустических волн в водной толще и в первом сейсмическом слое в точках заверки. В табл. 2 приведены значения глубин дна и кровли мерзлых пород в 6 точках заверки кровли многолетнемерзлых грунтов, выявленной на участке (–17) – (–19) км судового хода, а также время отражения от этих

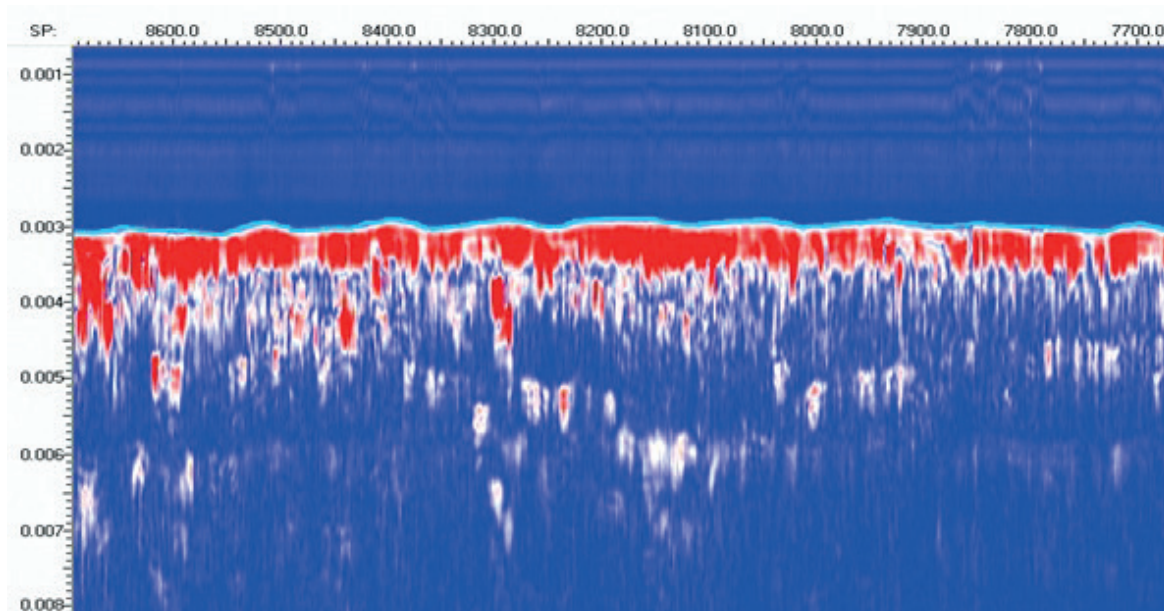


Рис. 6. Пример оцифровки донного отражения (голубая линия) на фрагменте сейсмоакустического разреза. Четко выделяется только граница «вода–дно». Здесь и на рис. 7 по оси ординат – секунды; по оси абсцисс – номера сейсмических трасс

Fig. 6. Example of bottom reflection digitization (blue line) on a fragment of a seismoacoustic section. Only the water-bottom boundary is clearly visible. Here and in Figure 7 the ordinate axis represents seconds, and the abscissa axis represents the numbers of seismic traces

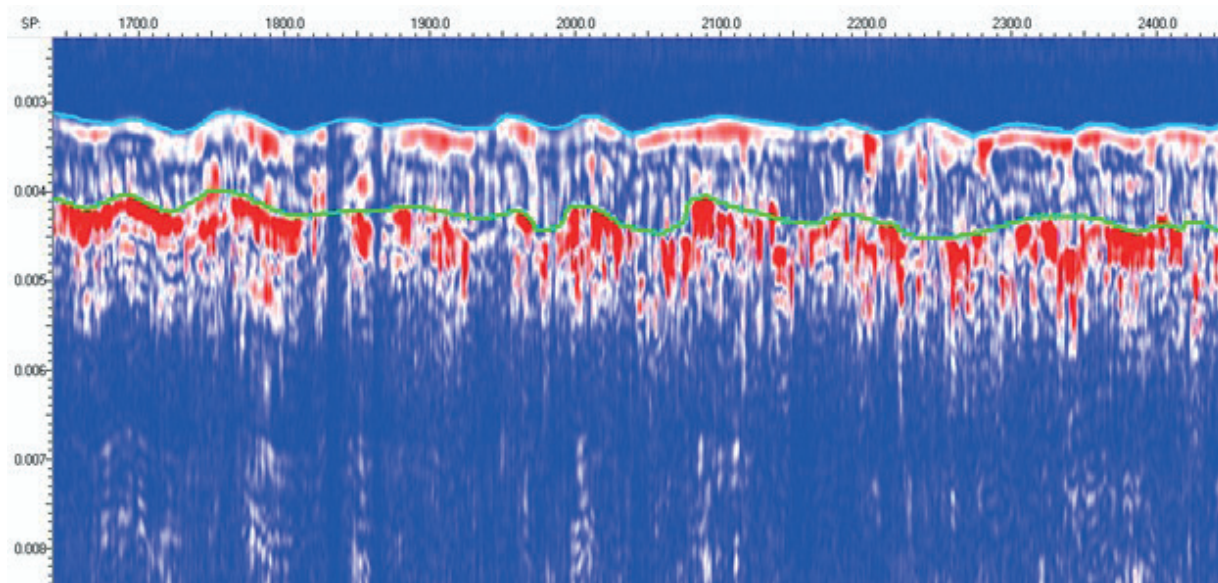


Рис. 7. Фрагмент сейсмоакустического разреза. Подповерхностная граница выделяется весьма уверенно, обладает высокой интенсивностью (зеленая линия)

Fig. 7. A fragment of the seismoacoustic section. The bottom boundary is clearly defined and has a high intensity (green line)

границ на сейсмических разрезах. На основе данных глубин границ в точках заверки и времени на сейсмических разрезах вычислены скорости распространения акустических волн по формулам:

$$\text{скорость в водной толще} = \frac{\text{глубина дна в точках заверки (м)} \times 2 \times 1000}{\text{время отражения от дна на сейсмическом разрезе (мс)}}$$

$$\text{скорость в слое от дна до кровли мерзлых пород} = \frac{\text{мощность слоя до кровли мерзлоты (м)} \times 2 \times 1000}{\text{временная мощность слоя до кровли мерзлоты на сейсмическом разрезе (мс)}}$$

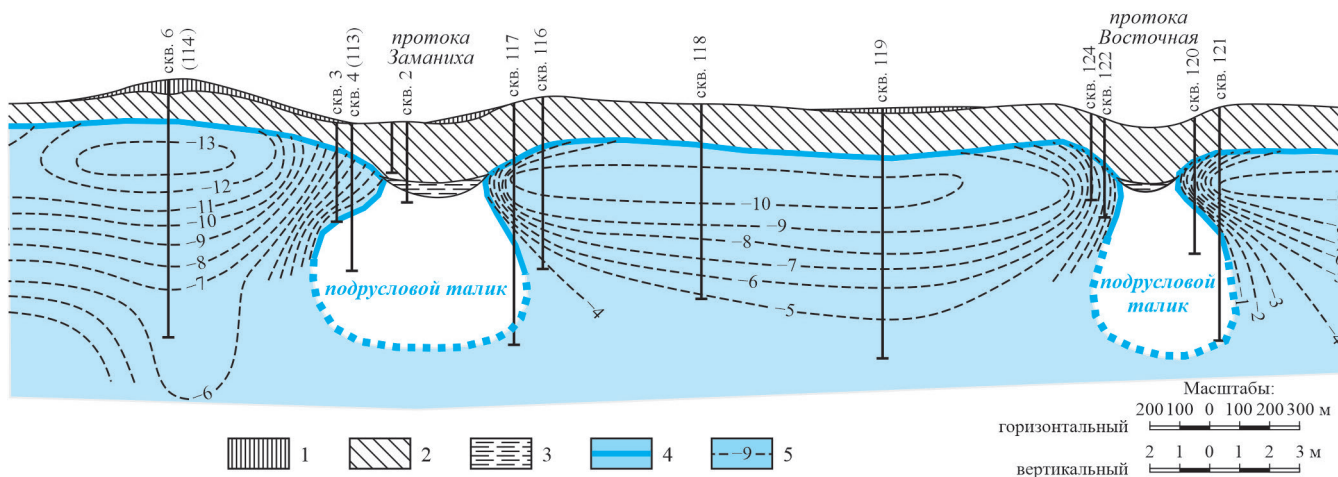


Рис. 8. Адаптированный и дополненный по материалам изысканий 2024 г. температурный разрез подвальной толщи донных отложений бара р. Яны, составленный Нижнеянской группой Северо-восточной экспедиции МГУ (май 1971 г.) (Исследование мерзлотно-геологических условий..., 1972) (положение линии температурного разреза представлено на рис. 2Б): 1 — снег; 2 — лед; 3 — вода; 4 — граница мерзлых грунтов; 5 — изотермы

Fig. 8. Adapted and supplemented according to the materials of the 2024 survey, the temperature section of the underwater stratum of the bottom sediments of the Yana River bar, compiled by the Nizhnyaya expedition of the North-Eastern expedition of the Moscow State University (May 1971) (Study of permafrost-geological conditions..., 1972) (the position of the temperature section line is presented in Figure 2B): 1 — snow; 2 — ice; 3 — water; 4 — the boundary of frozen soils; 5 — isotherms

Средние значения скоростей распространения акустических волн в водной толще и в первом сейсмическом слое (до кровли мерзлых пород) составили 1470 и 1710 м/с соответственно.

Характеристика распространения мерзлоты в пределах бара Яны (по материалам предыдущих исследований)

Общим фоном, определяющим мерзлотные условия в дельте Яны, является сплошное распространение многолетнемерзлых грунтов (ММГ) мощностью до 400–500 м. В пределах аванделты и под дном Янского залива также развиты мерзлые породы, мощность которых составляет не менее 20 м (Григорьев, 1966). Однако до настоящего времени не было убедительных данных о характере распространения мерзлоты под руслами дельтовых проток и в баровых бороздинах. Единственная совершенная ранее попытка изучения характера распространения мерзлоты в пределах трассы судового хода на баровом участке Яны с помощью геофизических (георадарных) методов была осуществлена в навигацию 2000 г. совместно специалистами Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и географического факультета МГУ, она оказалась малоинформативной из-за неблагоприятных погодных условий и нестабильной работы аппаратуры (по устному сообщению одного из руководителей тех работ — д.г.н. В.Н. Коротаева).

Ледовые условия в дельте Яны, обусловленные ее термическим режимом, характеризуются наличием

ледяного покрова в течение 240–250 суток в году. В устье реки первые ледяные образования появляются в среднем 22 сентября и уже через 10 суток начинается ледостав. Толщина льда на нижней Яне достигает значительных величин, к середине апреля она доходит до 2.0–2.2 м (Нижняя Яна..., 1998). Поэтому большинство дельтовых проток перемерзает на перекатах полностью. На баровом участке толщина льда в бороздинах достигает 1.8–2.0 м, но, как отмечалось в работе (Коротаев, 2012), «полного перемерзания бороздин чаще всего не происходит в связи со значительной (до 20‰) соленостью воды в них. Что касается крыльев бара, то толщина льда на них всегда превышает глубину, и они промерзают на значительную глубину».

Большая часть выполненных во второй половине XX в. геокриологических исследований (Григорьев, 1966; Иванов, 1969; Некрасов, Девяткин, 1974) не акцентировалась на изучении мерзлотных условий непосредственно в пределах бороздин баровых участков Яны. Исключением являются работы географического факультета МГУ 1970–1973 гг. (Исследование мерзлотно-геологических..., 1972), которые сопровождалось бурением отдельных скважин и наряду с изучением мерзлотных условий периферийной мелководной части бара затрагивали русловые участки бороздин Заманиха и Восточная. На рис. 8 в виде температурного разреза приведены результаты мерзлотно-геологических исследований 1971 г. В современных условиях положение разреза

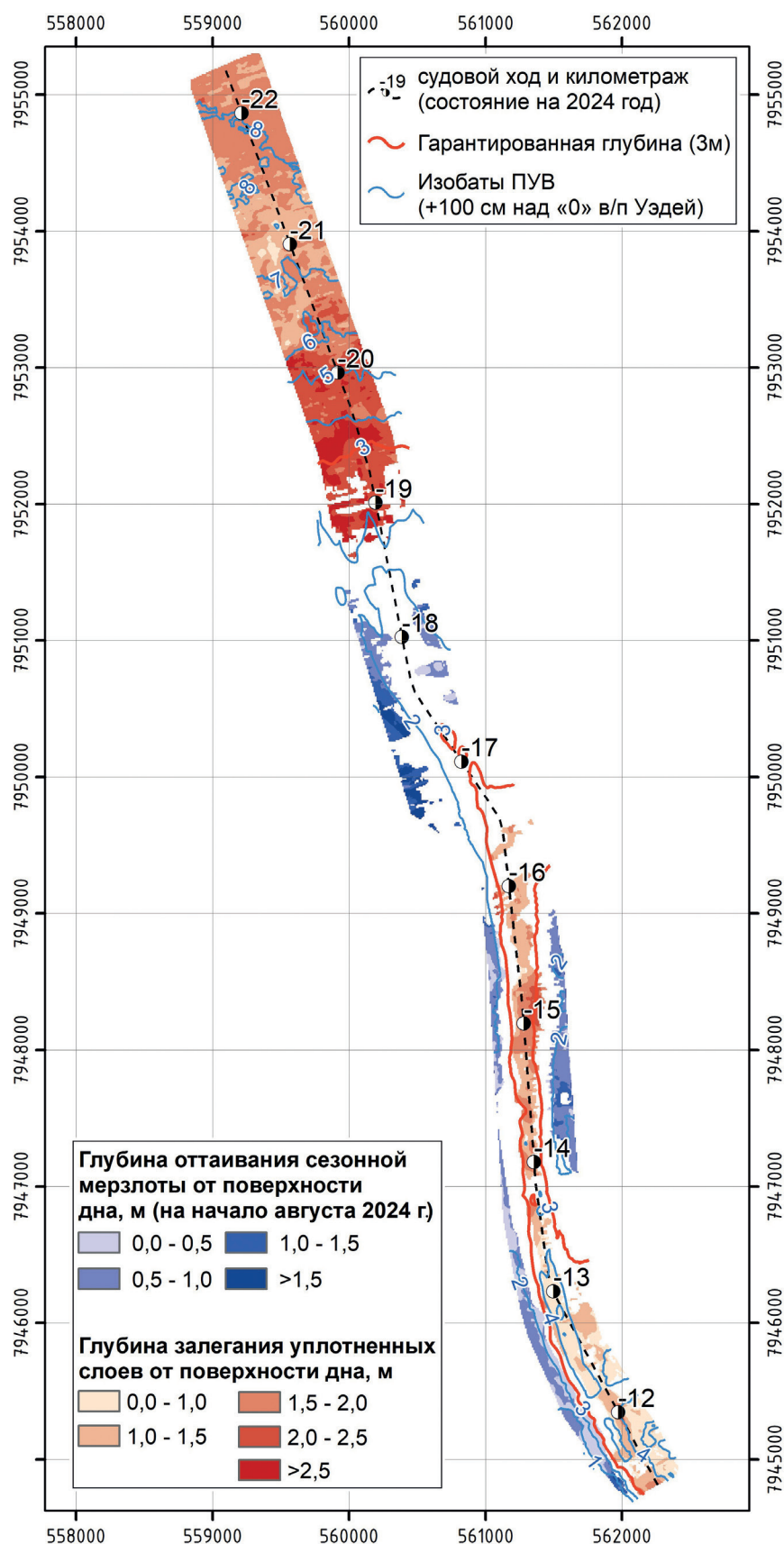


Рис. 9. Схема распространения сезонной мерзлоты и уплотненных слоев донного грунта (немёрзлых) на (–11) – (–22) км судовой бороздины Заманиха

Fig. 9. Distribution of seasonal permafrost and compacted layers of bottom soil (not frozen) at –11 to –22 km of the Zamanikha shipping channel

пересекает судовой протоку Заманиха на –15.7 км (рис. 2).

Наибольший интерес на приведенном разрезе представляют скважины, пробуренные в районе кромок русловых бороздин Заманиха и Восточная. Так, скважина № 2 была пробурена в левобережной части русла протоки Заманиха на расстоянии около 200 м от ее крутого склона. Пройдя слой льда толщиной около 2.0 м и слой воды в 0.5 м, скважина была углублена на 0.5 м в донные отложения, не сцементированные льдом. Следующие по профилю скважины № 4 (113) и № 3 были пробурены на расстоянии соответственно 190 и 230 м к юго-западу от скважины № 2, уже в краевой части бара, где слой льда мощностью 0.9 и 1.15 м лежал на мерзлых донных отложениях. Эти скважины, пройдя мерзлую толщу мощностью 1.8 и 2.2 м, вошли в талые отложения. Аналогичная картина (по материалам «Исследование мерзлотно-геологических условий..., 1972) наблюдалась в зимнее время и по скважинам № 120 и № 122.

Таким образом, результаты предыдущих исследований показали наличие подруслового талика под обеими бороздинами барового участка р. Яны. Распространение слоя сезонного промерзания («козырьки» сезонной мерзлоты) мощностью от нескольких см до 2.0 м невелико в площадном отношении (не превышает 150–200 м в сторону от основных русел проток)

Таблица 2. Значения глубин дна и кровли многолетнемерзлых пород, времени отражения от этих границ на сейсмических разрезах и скорости распространения акустических волн на участке (–17) – (–19) км судового хода (скважины заверки № 28–33)

Table 2. Values of the depths of the bottom and roof of permafrost rocks, the time of reflections from these boundaries on seismic sections, and the speed of propagation of acoustic waves in the area –17 to –19 km of the ship channel (wells № 28–33)

№ скважины заверки	Широта	Долгота	Глубина дна от ПУВ, м	Расстояние до кровли мерзлых пород от ПУВ, м	Мощность слоя до кровли мерзлых пород, м	Время отражения от дна, мс	Время отражения от кровли мерзлых пород, мс	Рассчитанная скорость в водной толще, м/с	Рассчитанная скорость в слое до кровли мерзлых пород, м/с
28	136.7205	71.6486	2.40	3.30–3.40	0.90–1.00	3.3	4.4	1450	1730
29	136.7194	71.6513	2.00	3.10–3.20	1.10–1.20	2.6	4	1540	1640
30	136.7190	71.6538	2.00	2.50–2.60	0.5–0.6	2.7	3.3	1480	1810
31	136.7143	71.6575	2.00	2.90–3.00	0.9–1.0	2.8	4.0	1430	1580
32	136.7173	71.6593	2.30	4.10–4.20	1.8–1.9	3.2	5.3	1440	1760
33	136.7102	71.6629	2.50	4.20–4.30	1.7–1.8	3.5	5.5	1430	1750

и ограничивается изобатой, соответствующей максимальной толщине льда, лежащего на дно. Результаты выполненной в 2024 г. «заверки» вертикальной стратиграфии донных отложений в целом подтверждают эти материалы. На всех скважинах апробирования мерзлоты, расположенных на периферийной части судоходной бороздины, в результате формирования в зимний период непосредственного контакта со льдом формируется сезонная мерзлота, деградирующая в период навигации. На период обследования (конец июля – август 2024 г.) остатки сезонного промерзания были зафиксированы в 30% точек заверки. Отметка кровли промерзшего горизонта в среднем фиксировалась на глубине 80–100 см от поверхности дна. Сам промерзший слой, в среднем имеющий мощность 50–70 см, был уже достаточно обводнен, не был сцементирован и при значительной физической нагрузке пробуривался пробоотборником полностью, после чего следовали не связанные мерзлотой грунты. Глубина в точках фиксации, где были выявлены следы сезонного промерзания, не превышала 2.5 м.

Зачастую вдоль судоходной бороздины в 2024 г. фиксировались сильно уплотненные слои грунта на различной глубине от поверхности дна. Некоторые авторы (Григорьев, 1966; Коротаев и др., 1978) объясняют такие уплотнения существованием не мерзлых (сцементированных льдом), а морозных пород. Подобное явление отмечалось и на бере Яны в протоке Правой (Куотастаах) (Григорьев, 1952), где по данным бурения под слоем сезонного протавивания были обнаружены перелетки из мерзлых

пород мощностью 0.6–2.5 м, под которыми залегают талые грунты.

Описание результатов НСАП вдоль трассы судового хода

Результаты обработки данных НСАП и мелко-глубинного бурения позволили визуализировать информацию о пространственном распространении ММГ, сезонно промерзающих и непромерзающих грунтов в пределах судоходной бороздины Заманиха (рис. 9, 10), а также дать количественную оценку распространения ММГ в различном диапазоне глубин от ПУВ.

Участок (–11) – (–15) км

Характеризуется выраженным распространением сезонной мерзлоты левого, обрывистого борта судоходной бороздины. Целый ряд источников (Исследование мерзлотно-геологических условий..., 1972; Григорьев, 1966) указывает на близкое расположение здесь мощного ядра многолетней мерзлоты, которое сковывает массив низких дельтовых островов и отмелей, ограничивая развитие баровой бороздины в западном направлении. Однако в пределах обследованной полосы многолетнемерзлые грунты выявлены не были. Сезонная мерзлота формирует классический «kozyрек», хорошо прослеживаемый на рис. 8. Результаты бурения 1971 г. (Исследование мерзлотно-геологических условий..., 1972) также не выявляли здесь многолетнемерзлых грунтов (ММГ), фиксируя выраженный подрусловой талик. При этом за прошедшие 50 лет левый борт бороздины продолжает занимать здесь

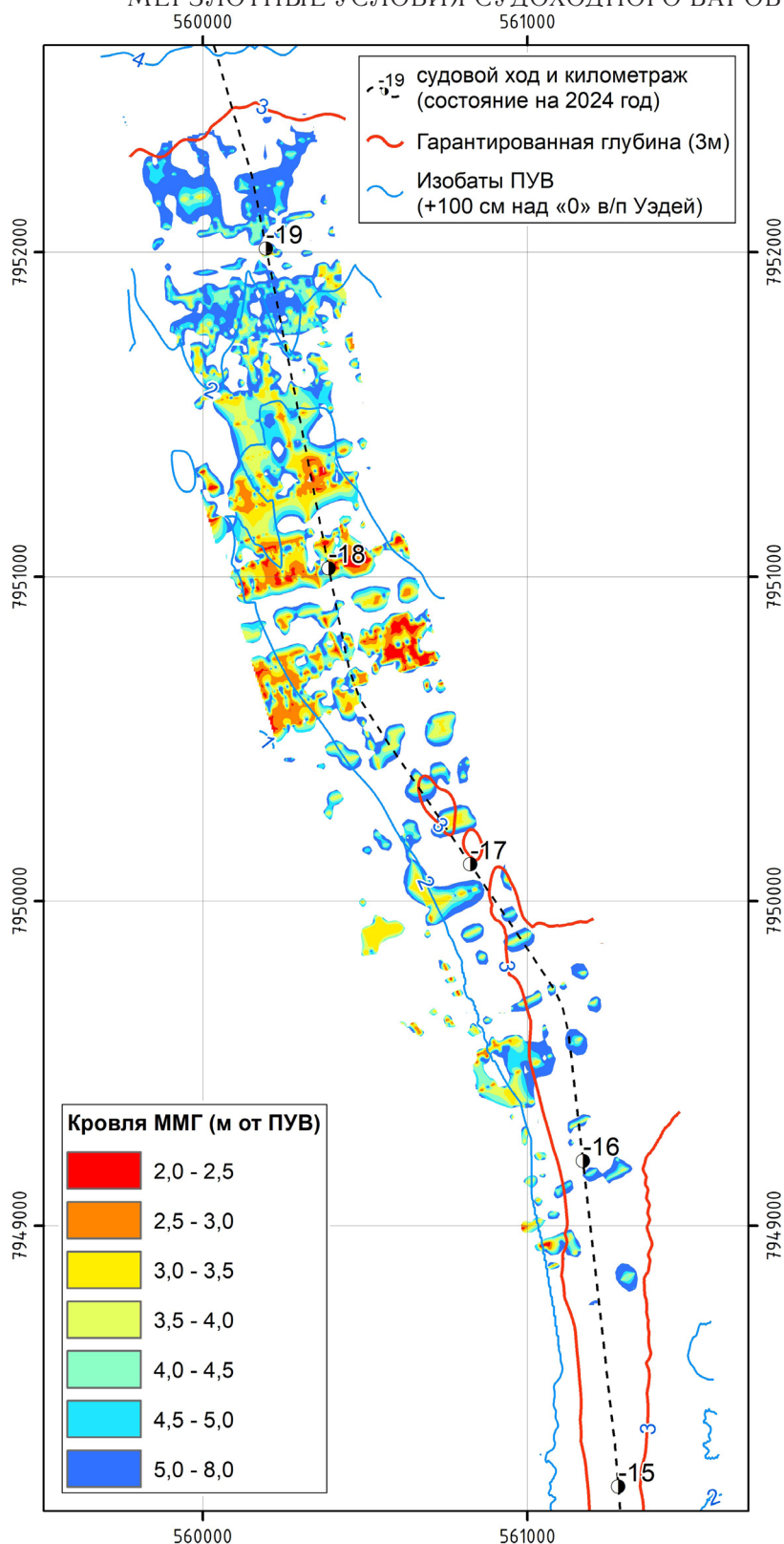


Рис. 10. Схема распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) на (–15) – (–19) км судовой бороздины Заманиха

Fig. 10. Distribution pattern of permafrost soils (PMS) at –15 to –19 km of the Zamanikha shipping channel

устойчивое положение, а направленное отепляющее воздействие водного потока, по-видимому, компенсируется стабилизирующим влиянием широкого мерзлотного поля вдоль всей западной части бороздины, вплоть до –15 км судового хода.

Сезонное промерзание вдоль правого борта судовой бороздины фиксируется в пределах массивного побочня, увеличение размеров которого наиболее четко прослеживается в последние 5 лет. Мощность сезонной мерзлоты достигает здесь 1.5 м, впрочем, как и на остальных участках, она полностью оттаивает к концу теплого периода.

Значительные глубины вдоль правой кромки рассматриваемого участка не способствуют формированию сезонного промерзания. Этому также препятствуют формирующиеся течения, связанные с перетоком части стока в восточную часть бара (в направлении ранее судовой бороздины Восточная). Наиболее глубоководная, стрессовая часть выстилается уплотненным слоем алевритов и песков, залегающим непосредственно на поверхности.

Участок (–15) – (–17) км

Последние 10–15 лет участок находится в зоне активных русловых переформирований. Вдоль левобережной кромки судовой бороздины сформировалась обширная мелководная зона (побочень) с минимальными глубинами 1–1.5 м, что способствует ее активному промерзанию в зимний период и последующему оттаиванию летом. Средствами НСАП в толще донных отложений выявлены локальные мерзлотные участки, интерпретированные как кровля линз ММГ. Преимущественно они встречаются вдоль левой кромки баровой бороздины и приурочены к зоне аккумуляции наносов. Ниже по течению встречаемость линз ММГ возрастает, они постепенно будут объединяться в массивные мерзлотные поля. В табл. 3, 4 приводится информация о площади распространения и глубине залегания кровли ММГ в пределах участка от –15 до –17 км.

В пределах глубоководной части в районе –16 км консолидированный выше по течению поток делится на два

Таблица 3. Площадь распространения (м²) многолетнемерзлых грунтов на участке (–15) – (–17) км судового хода в полосе шириной 500 м**Table 3.** Area of permafrost distribution (m²) in the area –15 km to –17 km of the shipping lane in a 500 m wide strip

Диапазон глубин от ПУВ, м	(–15.0) – (–15.5) км	(–15.5) – (–16.0) км	(–16.0) – (–16.5) км	(–16.5) – (–17.0) км	Всего (–15) – (–17) км
2.0–2.5		409	224	322	955
2.5–3.0		956	1267	1257	3480
3.0–3.5		2199	3443	8511	14 153
3.5–4.0		4711	6848	7585	19 144
4.0–4.5		7361	8861	8752	24 974
4.5–5.0		6420	9250	8444	24 114
5.0–6.0		10 994	16 638	18 230	45 862
6.0–7.0		18			18

стречня, один из которых следует в направлении современной трассы судового хода – в бороздину Заманиха, а второй перераспределяет значительный расход воды в правостороннее ответвление, формируя вторую составляющую стока воды на баровом участке (бороздину Восточную). Как и выше по течению, для глубоководных стречневых зон характерны переслоения несвязанной песчано-алевритистой фракции с более уплотненным горизонтом, формирующимся на глубине 0.5–1.5 м от поверхности дна, а местами выходящим непосредственно в русло.

Наиболее мелководный участок судоходной бороздины Заманиха расположен на (–17) – (–19.5) км. Здесь ежегодно выполняется основной объем дноуглубительных работ, и именно здесь возникают проблемы с разработкой выходов многолетнемерзлых грунтов. Материалы НСАП фиксируют устойчивое отражение от кровли мощного слоя, имеющего разновысотное распространение (рис. 11). Результаты натурной заверки данного слоя показали его мерзлотное состояние. При этом плотность и консистенция не позволили пройти этот слой ручным буром даже при значительных нагрузках. Кровля слоя представлена преимущественно алевритом с включениями песка и глинистой фракции. Минимальная глубина кровли ММГ была зафиксирована на (–18) – (–18.5) км судового хода (2.3–2.5 м от проектного уровня воды). Результаты картирования верхней поверхности данного слоя показывают следующие характеристики (табл. 5, 6).

Наибольшее распространение выходы ММГ получают на (–17.5) – (–18.5) км, где они представляют обширные поля, местами перекрывающие всю ширину обследованного участка. На (–18) – (–19) км они выходят на отметки 2.5–3.0 м непосредственно в пределах современного положения трассы судового хода, что вызывает необходимость их

разработки в процессе дноуглубления. Только начиная с –19 км линзы ММГ опускаются ниже 3.5 м от ПУВ, переставая осложнять путевые работы.

Вопрос генезиса ММГ на этом участке остается недостаточно ясен и требует специализированных наблюдений за термическим режимом и глубинного бурения. Очевидно, что здесь возможно полное перемерзание баровой бороздины в зимний период, с рассредоточением подледного стока в расположенные выше по течению ответвления. В таких условиях смыкание сезонной мерзлоты с глубинным ядром ММГ способствует восстановлению в зимний период высотных отметок последних даже в случае их разработки в процессе дноуглубительных работ в навигационный период. Восстановление на следующий год мерзлотных линз («кочек», по терминологии путевых специалистов) в одном и том же месте даже после их «разработки» земснарядами отмечается в отчетах по путевым работам.

Нижний участок судоходной бороздины с –19.5 до –22 км относится к морскому склону бара. Здесь происходит направленное и достаточно интенсивное увеличение глубин (до 7–8 м от ПУВ), а гидрологический режим определяется в первую очередь морскими факторами. Поверхностные донные отложения представлены исключительно илами и алевритами, мощность которых возрастает до 2–3 м по мере роста глубин. Материалы НСАП показывают наличие плотных грунтов под толщей относительно рыхлых илистых отложений. Натурная заверка кровли данного слоя в 2024 г. не осуществлялась из-за большой глубины на этом участке. Информацию о состоянии грунтов можно получить из работы (Григорьев, 1966), в которой приводится температурный разрез донных отложений в пределах «таликовых желобов стока» (баровой бороздины Главное Русло бара Яны)

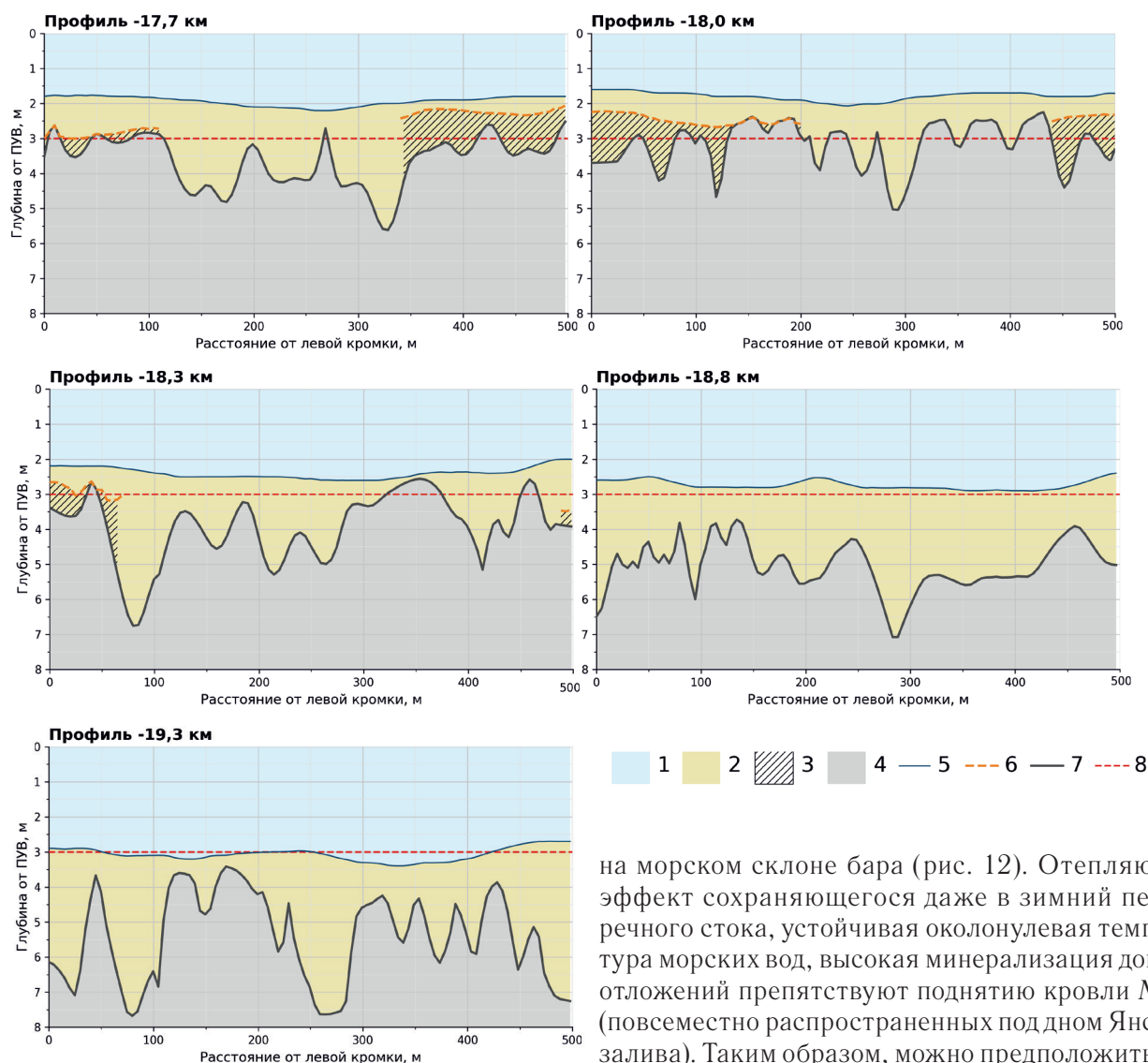


Рис. 11. Схематизация сейсмоакустических поперечных профилей в пределах наиболее мелководной части баровой бороздины Заманиха ((–17.0) – (–19.5) км): 1 – вода; 2 – немерзлые грунты; 3 – неоттаявший (на август 2024 г.) слой сезонного промерзания; 4 – многолетнемерзлые грунты; 5 – поверхность дна; 6 – кровля сезонной мерзлоты; 7 – кровля многолетнемерзлых грунтов; 8 – гарантированная судоходная глубина 3.0 м

Fig. 11. Schematization of seismic and acoustic transverse profiles within the shallowest part of the Zamanikha Channel ((–17.0) – (–19.5) km): 1 – water; 2 – unfrozen soils; 3 – non-thawed (as of August 2024) layer of seasonal freezing; 4 – permafrost soils; 5 – the surface of the bottom; 6 – the roof of the seasonal permafrost; 7 – the roof of permafrost soils; 8 – guaranteed navigable depth of 3.0 m

на морском склоне бара (рис. 12). Отепляющий эффект сохраняющегося даже в зимний период речного стока, устойчивая околонулевая температура морских вод, высокая минерализация донных отложений препятствуют поднятию кровли ММГ (повсеместно распространенных под дном Янского залива). Таким образом, можно предположить, что описанный слой современных многолетнемерзлых отложений, формирующийся выше по течению в пределах мелководной части бара, выклинивается уплотненными грунтами, не подверженными как сезонному промерзанию, так и цементирующему влиянию многолетней мерзлоты. По крайней мере в верхнем слое до глубины 5.0 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты геофизического обследования барового участка р. Яны вдоль трассы судового хода (от –11 до –22 км) и анализ архивных материалов позволяют сделать следующие выводы:

1. Основной массив барового участка формируется в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), кровля которых залегает на отметках около 1.0–2.0 м от поверхности дна. В зимний период верхний слой полностью промерзает, смыкаясь с ММГ, а в летне-осенний

Таблица 4. Площадь распространения (м²) многолетнемерзлых грунтов на участке (–15) – (–17) км судового хода в полосе судового хода (ширина 60 м)**Table 4.** Area of distribution (m²) of permafrost soils in the area (–15) – (–17) km of the shipping lane in the shipping lane (width 60 m)

Диапазон глубин от ПУВ, м	(–15.0) – (–15.5) км	(–15.5) – (–16.0) км	(–16.0) – (–16.5) км	(–16.5) – (–17.0) км	Всего (–15) – (–17) км
2.0–2.5					
2.5–3.0				6	6
3.0–3.5			114	100	214
3.5–4.0		44	388	670	1102
4.0–4.5		188	538	1119	1845
4.5–5.0		216	761	1353	2330
5.0–6.0		1194	2957	4668	8819
6.0–7.0		8			8

Таблица 5. Площадь распространения (м²) многолетнемерзлых грунтов на участке (–17) – (–19.5) км судового хода в полосе шириной 500 м**Table 5.** Area of permafrost (m²) on the section –17 km to –19.5 km of the shipping lane in a 500 m wide strip

Диапазон глубин от ПУВ, м	(–17.0) – (–17.5) км	(–17.5) – (–18.0) км	(–18.0) – (–18.5) км	(–18.5) – (–19.0) км	(–19.0) – (–19.5) км	Всего (–17) – (–19.5) км
2.0–2.5	30	12 248	6982			19 260
2.5–3.0	99	32 490	25 273	1718		59 580
3.0–3.5	6946	22 515	30 145	11 387	163	71 156
3.5–4.0	11 792	20 772	34 392	21 522	2123	90 601
4.0–4.5	11 569	22 762	30 358	33 070	8576	106 335
4.5–5.0	12 648	20 278	26 100	31 750	13 837	104 613
5.0–8.0	23 468	13 303	17 325	50 852	62 293	167 241

Таблица 6. Площадь распространения (м²) многолетнемерзлых грунтов на участке (–17) – (–19.5) км судового хода в полосе судового хода (ширина 60 м)**Table 6.** Area of permafrost (m²) on the section –17 km to –19.5 km of the shipping lane in the shipping lane (width 60 m)

Диапазон глубин от ПУВ, м	(–17.0) – (–17.5) км	(–17.5) – (–18.0) км	(–18.0) – (–18.5) км	(–18.5) – (–19.0) км	(–19.0) – (–19.5) км	Всего (–17) – (–19.5) км
2.0–2.5		321	1248			1569
2.5–3.0		1616	6034	199		7849
3.0–3.5	991	2078	4398	676	152	8295
3.5–4.0	3422	2016	3792	1752	178	11 160
4.0–4.5	2474	2976	4620	5111	2015	17 196
4.5–5.0	2057	2244	2804	2912	1341	11 358
5.0–6.0	4809	2016	1313	8116	8122	24 376

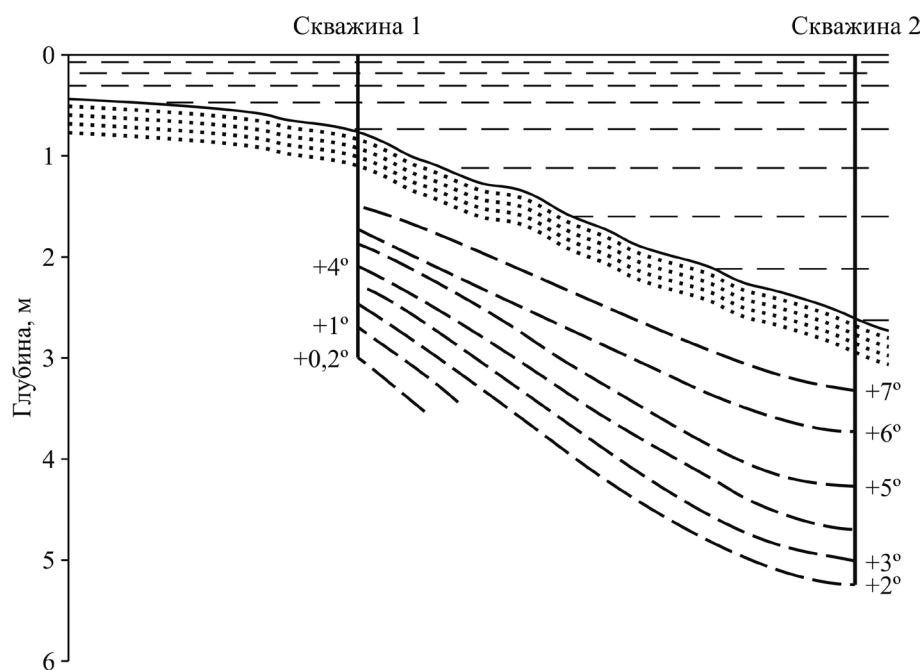


Рис. 12. Температурный разрез донных отложений на морском склоне бара р. Яны в пределах протоки Главное Русло (май 1963 г.). По (Григорьев, 1966)

Fig. 12. Temperature section of bottom sediments on the marine slope of the river bar. The Yany River within the Main Channel (May 1963). According to (Grigoriev, 1966)

период происходит постепенное оттаивание верхнего слоя. Исключением является район развития баровых бороздин, а также прилегающая к нему зона активных русловых переформирований, где формируется несквозной подрусловой талик. Причиной формирования талика является отепляющее воздействие водного потока на дно и борта бороздин, а также весьма интенсивные русловые переформирования, способствующие периодическому перемещению динамической оси потока. Борты бороздин промерзают в зимний период, но оттаивают в теплое время года. Причем даже в случае планового смещения стрежневой зоны бороздин и формирования аккумулятивных форм на ранее глубоководных участках многолетняя мерзлота не образуется достаточно длительный период. По крайней мере в пределах динамично смещающихся вдоль судоходной бороздины побочней ММГ не были обнаружены до глубины 5 м (от поверхности дна).

2. В современных условиях на участке развития баровых бороздин выделяются два типа мерзлых грунтов — сезонно промерзающие и многолетнемерзлые грунты. Сезонная мерзлота распространена повсеместно, за исключением плесовых участков с глубинами более 2.5–3.0 м (от ПУВ), где концентрируется подледный зимний сток. После прохождения ледохода сезонная мерзлота достаточно быстро деградирует и к началу августа (период обследования 2024 г.) встречается весьма фрагментарно, фактически не создавая затруднения для выполнения дноуглубительных работ. Остатки сезонной мерзлоты при верификации были вскрыты в 8 скважинах на глубине 2–2.5 м с остаточным

слоем промерзания около 50 см. При этом мерзлый слой на начало августа был достаточно рыхлым и позволял полностью проходить его геологоразведочным шнеком. Очевидно, к концу навигационного периода сезонная мерзлота исчезает полностью.

3. В условиях формирования подруслового талика многолетнемерзлые грунты встречаются весьма ограниченно и относительно консолидированно выходят в верхнюю толщу донных отложений только непосредственно на наиболее мелководном участке бара — с –17 по –19.5 км. Скорее всего, «гребень» ММГ пересекает ось судового хода поперек течения, объединяясь с основным мерзлотным полем на удалении 300–400 м в обе стороны от оси судового хода. По данным НСАП, установленная граница кровли ММГ была картографически визуализирована в виде разноуровневых линз на участке от –17.5 до –20 км. Локальные выходы ММГ были встречены на (–16) — (–17.5) км непосредственно в границах трассы судового хода, а также относительно крупными линзами слева от судового хода. Общая площадь зон распространения ММГ на глубине до 5 м (от поверхности дна) не превышает в пределах исследованного участка 30% (только для участка (–15.5) — (–19.5) км, где были зафиксированы линзы ММГ), при этом в пределах глубины до 3–3.5 м от ПУВ (где потенциально ММГ могут ограничивать дноуглубительные работы) — 8%.

4. На участке (–17.5) — (–19.0) км, где кровля ММГ поднимается выше 3.0 м от ПУВ, судоходная бороздина Заманиха в пределах трассы судового хода к концу зимнего периода может полностью перемерзнуть, вызывая смыкание сезонной и многолетней мерзлоты и приводя к рассредоточению

подледного стока. В начальный период навигации это приводит к необходимости разработки дно-углубительным флотом мерзлых грунтов с целью обеспечения гарантированных глубин.

5. Результаты исследования позволили обосновать варианты оптимизации планового положения трассы судового хода с учетом условий распространения и глубины залегания ММГ. Были рассмотрены траектории судового хода, позволяющие в 2–3 раза уменьшить объемы разработки ММГ по сравнению с современным производством дно-углубления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Анализ материалов полевых исследований проведен по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова «Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений» (№ 126040819884-7). Авторы выражают благодарность организациям (ФБУ «Администрация Ленского бассейна», ООО «Экспертная лаборатория «Гидроинформационные системы»), предоставившим материалы для исследования.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 103-00001-26-00 от 15.01.2026

ЛИТЕРАТУРА

Бутаков А.Н. Динамика устьевых баров. — Труды ЛИВТ. 1972. Вып. 137. С. 5–18.

Григорьев Н.Ф. Мерзлотно-геологические особенности северной части дельты реки Яны в районе устья протоки Правой // Сборник «Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике». М. Вып. 3. 1952.

Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы Приморской зоны Якутии. М.: Наука. 1966. 181 с.

Иванов М.С. Современные многолетнемерзлые прибрежные дельтовые отложения Янского взморья // Вопросы географии Якутии. Вып. 5. Якутск. 1969.

Изменение климата в Российской Арктике: риски и новые возможности // Доклад ФГБУ ГГИ. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. Март, 2022.

Исследование мерзлотно-геологических условий на бере реки Яны с целью повышения эффективности дноуглубительных работ. Отчет по НИР. Москва. МГУ. 1972.

Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях. — М.: Недра, 1983. — 204 с.

Коротаев В.Н. Геоморфология речных дельт. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 224 с.

Коротаев В.Н. Очерки по геоморфологии устьевых и береговых систем: Избранные труды. М.: Географ. ф-т МГУ. 2012. 540 с.

Коротаев В.Н. Геоморфология и история формирования дельты Яны // Эрозия почв и русловые процессы. М.: изд-во Географический ф-т МГУ. Т. 23. Москва: 2024. С. 311–337.

Коротаев В.Н., Лодина Р.В., Милошевич В.А., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Формирование дельты р. Яны и прогноз развития ее устьевых баров // Эрозия почв и русловые процессы. 1978. Вып. 6. С. 123–159.

Моря российской Арктики в современных климатических условиях // Под ред. И.М. Ашика. СПб.: ААНИИ. 2021. 360 с.

Некрасов И.А., Девяткин В.Н. Морфология криолитозоны бассейна реки Яны и сопредельных районов. Новосибирск: Наука, 1974. 71 с.

Нижняя Яна: устьевые и русловые процессы // Под ред. В.Н. Коротаева и др. М.: ГЕОС, 1998. 212 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). — М.: Росгидромет, 2025. 224 с.

Рекант П.В., Тумской В.Е., Гусев Е.А., Швенк Т., Шписс Ф., Черкашев Г.А., Кассенс Х. Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. — С. 332–348.

Рекомендации по комплексированию геофизических методов при инженерно-геологических изысканиях в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 1987. 36 с.

Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года // Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645.

<http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102888023>

Шалаева Н.В., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях: учебное пособие по курсу «Сейсмостратиграфия». 2-е изд., испр. и доп. — М.: Книжный дом Университет: Добросвет, 2024. — 343 с.

Impacts of a warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA (2004). Cambridge: Cambridge University Press. 139 pp.

ОБ АВТОРАХ

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The physical science Basis Rep* (1535 pp.). Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.

Lauzon, R., Piliouras, A., & Rowland, J.C. (2019). Ice and permafrost effects on delta morphology and channel dynamics. *Geophysical Research Letters*, 46, 6574–6582.

Niessen F. Profile of sediment echo sounding during cruise ARK-IX/4 with links to ParaSound data files // Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. Bremerhaven: PANGAEA, 2004a.

doi: 10.1594/PANGAEA.206530.

Niessen F. Profile of sediment echo sounding during cruise ARK-XI/1 with links to ParaSound data files // Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. Bremerhaven: PANGAEA, 2004b.

doi: 10.1594/PANGAEA.206531.

Завадский Александр Сергеевич: кандидат географических наук, в.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, az200611@rambler.ru

Ермаков Александр Петрович: кандидат геолого-минералогических наук, в.н.с. кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, ermakal@rambler.ru

Пятилова Анна Михайловна: кандидат технических наук, н.с. кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, ampiatilova@gmail.com

Головлев Павел Петрович: м.н.с. НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, pavel_golovlev@list.ru

PERFROST CONDITIONS OF THE YANA RIVER'S SHIPPING BAR SECTION

A.S. Zavadsky^{1,3,*}, A.P. Yermakov², A.M. Pyatilova², P.P. Golovlev¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

²*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology*

³*Russian University of Transport (MIIT)*

*az200611@rambler.ru

Abstract. The issues of spatial distribution and depth of permafrost in the estuary bars of the Arctic rivers of the Russian Federation have been studied rather fragmentarily, which is due to the inaccessibility and complex hydrological conditions for conducting field studies. One of the least studied areas is the bar section of the Yana River at the mouth of the Glavnoye Ruslo shipping channel. The last successful studies of permafrost conditions on the Yana bar date back to the early 1970s, when drilling operations were carried out (from the ice), which allowed for the characterization of the structure and temperature regime of the bottom sediments in certain areas, including the bar furrows where the river flow is concentrated.

In 2024, a complex of geophysical studies was carried out, including seismoacoustic profiling of the upper layer of bottom sediments, aimed at assessing the permafrost conditions within the Zamanikha navigable bar. At the same time, the results of profiling were verified using small-scale drilling. This article presents the results of summarizing archival materials and interpreting the data from the 2024 field studies, which allowed for the updating and refinement of the current background that determines the permafrost conditions in the studied bar area in the Yana Delta. Using GIS technologies, the spatial and depth distribution of permafrost and seasonally frozen soils along the shipping route was visualized and quantified.

Keywords: Yana River bar, seismoacoustic profiling, spatial distribution of seasonal and perennial permafrost, navigation conditions

ACKNOWLEDGEMENTS

The analysis of the field research materials was carried out according to the research plans (GR) of the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University “Erosion-Channel Systems: Hydrological Regime, Natural-Anthropogenic Transformations, and Forecast of Dangerous Manifestations” (No. 126040819884-7). The authors express their gratitude to the organizations (FBU “Administration of the Lena Basin”, LLC “Expert Laboratory “Hydroin-formation Systems”), which provided the materials for the study.

The work was carried out within the framework of the state assignment №103-00001-26-00 from 15.01.2026

REFERENCES

- Butakov A.N. Dynamics of the estuarine bar. — Proceedings of the LIVT. 1972. Issue 137. P. 5–18. (In Russ.)
- Climate change in the Russian Arctic: risks and new opportunities // The report of the FGBU GGI. The Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO. March, 2022. (In Russ.)
- Grigoriev N.F. Permafrost rocks of the Primorsky zone of Yakutia. M.: Nauka. 1966. 181 p. (In Russ.)
- Grigoriev N.F. Permafrost-geological features of the northern part of the Yana River delta in the area of the mouth of the Pravaya channel // Collection “Study of permafrost in the Yakut Republic”. M. Issue 3. 1952. (In Russ.)
- Impacts of a warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA (2004). Cambridge: Cambridge University Press. 139 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Climate Change 2013: The physical science Basis Rep (1535 p.). Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.
- Investigation of permafrost and geological conditions on the Yana River bar in order to increase the efficiency of dredging operations. Research report. Moscow. MSU. 1972. (In Russ.)
- Ivanov M.S. Modern permafrost coastal deltaic deposits of the Yangtze coast // Questions of the geography of Yakutia. Issue 5. Yakutsk. 1969. (In Russ.)
- Kalinin A.V., Kalinin V.V., Pivovarov B.L. Seismoacoustic studies in water areas. Moscow: Nedra, 1983. 204 p. (In Russ.)
- Korotaev V.N. Essays on the geomorphology of estuarine and coastal systems: Selected works. Moscow: Geograf. Faculty of Moscow State University. 2012. 540 p. (In Russ.)
- Korotaev V.N. Geomorphology and history of the formation of the Yana Delta // Soil erosion and riverbed processes. Moscow: Publishing house of Geographical Faculty of Moscow State University. Vol. 23. Moscow: 2024. P. 311–337. (In Russ.)
- Korotaev V.N. Geomorphology of river deltas. Moscow: Publishing House of Moscow. University, 1991. 224 p. (In Russ.)
- Korotayev V.N., Lodina R.V., Miloshevich V.A., Sidorchuk A.Yu., and Chalov R.S. Formation of the Yana River Delta and Prediction of the Development of Its Estuary Bars. Erosion of Soils and Channel Processes. 1978. Vol. 6. P. 123–159. (In Russ.)
- Lauzon, R., Piliouras, A., & Rowland, J. C. (2019). Ice and permafrost effects on delta morphology and channel dynamics. Geophysical Research Letters, 46. 6574–6582.
- Nekrasov I.A. and Devyatkin V.N. Morphology of the Cryolithozone in the Yana River Basin and Adjacent Areas. Novosibirsk: Nauka, 1974. 71 p. (In Russ.)
- Niessen F. Profile of sediment echo sounding during cruise ARK-IX/4 with links to ParaSound data files // Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. Bremerhaven: PANGAEA, 2004a. doi: 10.1594/PANGAEA.206530.
- Niessen F. Profile of sediment echo sounding during cruise ARK-XI/1 with links to ParaSound data files // Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. Bremerhaven: PANGAEA, 2004b. doi: 10.1594/PANGAEA.206531.
- Nizhnyaya Yana: estuary and channel processes. Edited by V.N. Korotaev et al. M.: GEOS, 1998. 212 p. (In Russ.)
- Recommendations for the integration of geophysical methods in engineering and geological surveys in areas with permafrost. Moscow: Stroyizdat, 1987. 36 p. (In Russ.)
- Rekant P.V., Tumszkoi V.E., Gusev E.A., Shveng T., Spiss F., Cherkashev G.A., Kassens H. Distribution and features of the subaquatic permafrost zone in the area of the Semenovskaya and Vasilyevskaya banks (Laptev Sea) according to seismoacoustic profiling // The Laptev Sea and adjacent Arctic seas system: current state and history of development. — Moscow: Moscow University Press, 2009. — P. 332–348. (In Russ.)
- Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2024 // Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Moscow: Roshydromet, 2025. 224 p. (In Russ.)
- Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions // Edited by I.M. Ashik. St. Petersburg: AII. 2021. 360 p. (In Russ.)

Shalaeva N.V., Starovoitov A.V., Tokarev M.Yu. Fundamentals of Seismoacoustics in Shallow Waters: textbook for the course “Seismostratigraphy”. 2nd edition, revised and expanded. — Moscow: University Book House: Dobrosvet, 2024. — 343 p. (In Russ.)

Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period up to 2035 // Decree of the President of the Russian Federation No. 645 dated 26.10.2020.

<http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102888023> (In Russ.)

ABOUT THE AUTHORS

Zavadsky Alexander Sergeevich: Candidate of Geography, Senior Researcher at the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes named after N.I. Makkaveev of the Faculty of Geography at Lomonosov Moscow State University, az200611@rambler.ru

Ermakov Alexander Petrovich: Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher at the Department of Seismometry and Geoacoustics of the Faculty of Geology at Lomonosov Moscow State University, ermakal@rambler.ru

Pyatilova Anna Mikhailovna: Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Department of Seismometry and Geoacoustics of the Faculty of Geology at Lomonosov Moscow State University, ampiatilova@gmail.com

Golovlev Pavel Petrovich: Junior Researcher at the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes at the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, pavel_golovlev@list.ru

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
№ 2. 2026

Формат обрезной 204x285
Объем 98 с.
Бумага офсетная
Печать цифровая
Тираж 25 экз.