

**ТРИДЦАТЬ ВОСЬМОЕ ПЛЕНАРНОЕ
МЕЖВУЗОВСКОЕ КООРДИНАЦИОННОЕ СОВЕЩАНИЕ
ПО ПРОБЛЕМЕ ЭРОЗИОННЫХ, РУСЛОВЫХ
И УСТЬЕВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Доклады и сообщения

УДК 551.48

ББК 26.823

T671

Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: доклады и сообщения (г. Пермь, 2–6 октября 2023 г.) / под ред. Р. С. Чалова, Н. Н. Назарова, Н. М. Михайловой, С. В. Копытова, С. Н. Ковалева, И. И. Никольской, А. В. Чернова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2023. – 244 с.

ISBN 978-5-7944-4026-3

Сборник содержит результаты исследований учёных вузов России, Беларуси, Узбекистана, Китая, Польши, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ, представленных в виде докладов и сообщений на XXXVIII пленарном совещании совета. Сборник рассчитан на специалистов в области русловых процессов, гидрологии рек, флювиальной геоморфологии, гидротехники, почвоведения, водных путей и мелиорации.

The collection contains the research results provided by scientists from universities Russia, Belarus, Uzbekistan, China united by the Intercollegiate Scientific Coordination Council on Erosion, Channel and mouth processes at Moscow State University submitted in the form of reports and communications at XXXVIII plenary meeting of the council. The collection is designed for specialists in the field of channel processes, river hydrology, fluvial geomorphology, hydraulic engineering, soil science, waterways and reclamation.

УДК 551.48

ББК 26.823

Печатается по решению оргкомитета совещания

Редакционная комиссия:

профессор *Р. С. Чалов*, д.г.н. *Н. Н. Назаров* (сопредседатели);
к.г.н. *Н. М. Михайлова* (учёный секретарь), к.г.н. *С. В. Копытов*,
к.г.н. *С. Н. Ковалёв*, к.г.н. *И. И. Никольская*, д.г.н. *А. В. Чернов*

Рецензенты: зам. директора Института водных и экологических проблем ДВО РАН, д-р геогр. наук **Махинов А. Н.**

ведущий научный сотрудник лаборатории геоморфологии Института географии РАН, канд. геогр. наук **Маккаев А. Н.**

ISBN 978-5-7944-4026-3

© ПГНИУ, 2023

ДОКЛАДЫ

С.Р. Чалов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**РАЗМЫВЫ БЕРЕГОВ, ИХ ВЛИЯНИЕ
НА СТОК НАНОСОВ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД:
РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА РЕКАХ БАССЕЙНА ЛЕНЫ***

Помимо традиционных направлений исследования русловых процессов, связанных с изучением их географических закономерностей и разработкой научно-обоснованных технологий управления руслами рек, в последние годы большое значение приобретают работы, нацеленные на внедрение методов математической статистики для получения прогнозных оценок русловых деформаций. В основе этих работ лежат современные автоматизированные ГИС-технологии. На их основе развитие получают оценки влияния русловой деятельности рек на сток наносов и вынос загрязняющих веществ. Первые из них основаны как на обширных балансовых оценках привноса наносов в реки в результате размыва берегов, так и данных о гранулометрическом составе взвешенных частиц, определяемых методами лазерной дифракции на лазерном гранулометре. Изучение геохимических проявлений русловых процессов стало возможным благодаря массовым данным о микроэлементном составе речных наносов, связанных с переходом от полуквантитативного спектрального к масс-спектральному анализу.

В настоящей работе на примере бассейна Лены рассмотрены результаты междисциплинарных исследований размыва речных берегов, выполнявшихся в последние годы. Последовательно рассматриваются: режим плановых переформирований и возможности его количественной оценки; формирование русловой составляющей стока наносов; влияние режима русловых деформаций на баланс химических веществ.

**Режим плановых переформирований
и возможности его количественной оценки**

Оценка темпов русловых деформаций проведена на основе данных Global Surface Water Explorer (GSWE) [Pekel et al., 2016], которая содержит сведения об изменении площадей водных объектов в период с 1984 по 2021 г. и, следовательно, позволяет в автоматическом режиме дешифровать размывы берегов. Информация об изменении кон-

© Чалов С.Р., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 21-17-00181). В статье использованы расчеты, выполненные В.А. Ивановым, М.А. Виволанцевым, Г.Л. Шинкаревой и В.А. Ефимовым

туров русла характеризовалась набором данных Occurrence Change Intensity (OCI) – интенсивность изменения положений водной поверхности за разные периоды времени. Методика была подвергнута проверке на примере размывов нижней и средней Оби [Иванов, Чалов, 2021], где расчетные площади размывов по GSWE были сопоставлены с аналогичными данными ручной обработки снимков [Куракова, Чалов, 2019]. Величина погрешности определения параметров размыва берегов в среднем составляет 11%.

На этой основе выполнен анализ 1700 км нижнего течения р. Лена, 1200 км нижнего течения р. Вилюй на участке от устья до нижнего Вилюйского водохранилища, для 300 км нижнего течения р. Тюнг, 800 км р. Марха, 1100 км нижнего течения р. Алдан и 500 км р. Амги. Для всех указанных участков для 1-километровых сегментов русла определены следующие параметры размыва берегов: 1) площадь размыва левого берега $F_{лб}$; 2) площадь размыва правого берега $F_{пб}$; 3) площадь островного размыва F_o ; 4) суммарная площадь размыва на участке F .

Распределение размыва русла по длине исследуемого участка имеет неравномерный характер: на одних отрезках преимущественно размывается левый берег, на других – правый. В условиях широкопойменных разветвлений больше половины от всей площади русловой эрозии занимает островной размыв. Так, на средней и нижней Лене 59% размыва определено островной эрозией. Большие массивы расчетных данных позволили на этой основе методами многомерной статистики предложить новые подходы к прогнозу плановых переформирований. Для этого было выполнено сопоставление параметров размыва с гидролого-морфометрическими факторами режима русловых деформаций (ширина русла B_p , островов B_o , пояса руслоформирования поймы $B_{п.о}$ и соотношения между ними; уклон водной поверхности I ; глубина потока h и мощность потока QI при среднемаксимальном расходе воды Q , рассматриваемом как близком к руслоформирующему; удельный расход воды q , равный отношению расхода воды к глубине. При анализе протяженных участков рек (например, средней и нижней Лены, число данных о размыве берегов и их факторов более 300) значимые корреляции между указанными факторами и параметрами размыва выявлены не были. Однако при делении массива данных на отдельные морфологически однородные участки разветвленного русла (Покровский, Якутский, Намский, Усть-алданский, Белогорский, Сангарский, Монастырский, Черпальский, Сахамский) отдельные факторы демонстрируют достоверную связь (табл. 1) и отражают особенности динамики потока и распределения зон размыва в пределах конкретных участков русла.

Выделенные значимые предикторы использованы для построения расчетных моделей прогноза методом множественной линейной рег-

рессии. В качестве меры надежности использована величина R – коэффициент множественной корреляции ($R \geq 0,5$). Например, для Покровского узла разветвления уравнения оценки русловых деформаций были получены в виде:

$$F_o = -5,75B_p - 2,91B_{п.о} - 6,20I - 4,40q + 73,3 \quad (R = 0,64)$$

$$F_{общ} = -3,23B_{п.о} + 19,0 \quad (R = 0,64)$$

В данном случае обратная зависимость F_o и $F_{общ}$ от отражают приуроченность максимальных зон размыва Покровского узла разветвления к перекатным участкам русловых разветвлений.

Оценка русловой составляющей стока наносов

Обширные данные об интенсивности размыва берегов позволяют получить оценки объемов поступления грунтов в водный поток ($W_{русл}$) в результате плановых русловых деформаций за многолетний период. Значения высот берегов Оби, Енисея, Лены и Камчатки определены с использованием цифровой модели рельефа ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>) [Morin et al., 2016] при построении поперечных профилей в створах наибольшего размыва на выделенных участках. Для пересчета в единицы массы грунта использовалась средняя плотность размываемых грунтов принята из расчета $1,7 \text{ тонн/м}^3$ [Караушев, 1969].

По длине нижнего течения Лены суммарный объем русловой эрозии оценивается величиной в 338 млн. т год⁻¹, что почти в 10 раз превышает сток наносов в замыкающем створе Лены (38,6 млн. т год⁻¹). Это объясняется наличием исключительно неустойчивых участков интенсивных русловых переформирований, а также большой высотой размываемых берегов (7,5 м). Фактором, влияющим на роль русловой составляющей стока наносов на Лене, следует считать продолжительность руслонаполняющего расхода выше бровок поймы на Лене, который длится около 40 дней [Gautier et al., 2021; Hasholt et al., 2006]. Также, причиной больших объемов русловой эрозии можно считать активизацию термоэрозионных процессов в период повышенного стока [Gautier et al., 2021]. Фактор разрушения многолетнемерзлых пород [Chalov, Prokoreva, Habel, 2021; Magritsky et al., 2018] существенен для бассейна Лены, на 90 % [Strauss et al., 2021] расположенного в зоне вечной мерзлоты.

Следующий за этой балансовой оценкой вывод о важнейшей роли русловой составляющей в стоке наносов Лены подтверждается анализом гранулометрического состава взвешенных наносов. На основе анализа гранулометрического состава 79 проб взвешенных наносов р. Ле-

ны было установлено, что им характерна двумодальная форма распределения [Чалов, Ефимов, 2021]. Средний диаметр, разделяющий две основные группы крупности по точке локального минимума, равен 30 мкм (рис. 1). Соответствие крупности более мелкой фракции продуктам бассейновой эрозии, а более крупной – составу грунтов, слагающих аллювиальные пойменные толщи, позволяет рассматривать величину 30 мкм как граничную между бассейновой и русловой составляющими стока взвешенных наносов р. Лены. На основе такого допущения сделан вывод, что бассейновая фракция определяет 40 %, а русловая – 60% стока взвешенных наносов.

Влияние режима русловых деформаций на химический состав речных вод

Разрушение берегов оказывает влияние на химический состав речных вод. Оно связано как с поступлением широкой группы микроэлементов, так и органического вещества. Способствует этому разрушения многолетнемерзлых пород, слагающих значительную часть берегов Лены и являющихся хранилищами значительных объемов углерода и др.

Для оценки влияния размывов берегов на химический состав наносов в 2022 году выполнен отбор проб в береговых уступах из разных горизонтов пойменных почв в пределах Якутского долинного расширения на южной оконечности о. Пономарев. Содержание органического вещества определялось по «ГОСТ 26213 Почвы.

Таблица 1. Значимые факторы интенсивности размыва островов
в разветвлениях р. Лены

фактор	Разветвление	r	n	p , %
I	Покровское	-0,65	22	0,10
	Намское	-0,74	32	0
B_n	Намское	0,57	32	0,07
$B_p + B_o$	Белогорское	0,60	38	0,01
B_o	Белогорское	0,58	37	0,01
B_p	Покровское	0,60	22	0,34
	Белогорское	0,62	38	0
$B_{n,o}$	Покровское	-0,62	16	1,08
B_n/B_p	Намское	0,59	32	0,04
B_p/h	Белогорское	0,57	38	0,02
$(B_p+B_o)/B_p$	Белогорское	0,56	38	0,02
QI	Покровское	-0,65	22	0,10
	Намское	-0,74	32	0
B_o/B_p	Белогорское	0,53	37	0,08
q	Покровское	-0,60	22	0,34
	Белогорское	-0,62	38	0

* В таблице приведены только значимые предикторы (коэффициент корреляции Спирмена $r > 0.5$); n – число определений размыва

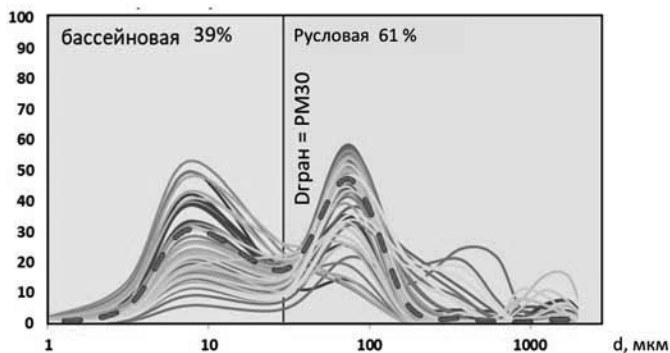


Рис. 1. Распределение среднего гранулометрического состава (пунктирная линия) и границ бассейновой и русловой фракций р. Лена (n=79) (график составлен В.А. Ефимовым)

Методы определения органического вещества». Глубина колонки отбора составила 126 см, пробы отбирались каждые 3 см. Анализ полученных данных показал, что весь профиль можно разбить на несколько участков: (1) верхние 27 см с малым содержанием органического вещества (1,0-1,3%); (2) средняя часть на глубине 27-48 см с относительно высоким содержанием органики (2,8-3,7%); (3) горизонт 51-54 см, из которого, по-видимому, происходило вымывание органического вещества (1,9%); (4) средняя часть на глубине 54-81 см с максимальным для этого профиля содержанием органики (3,0-4,2%); (5) нижняя часть на глубине 81-126 см, в которой происходит постепенное снижение количества органического вещества (от 3,4% до 1,0%). Характер распределения указывает на наличие погребенных почв на глубине 27-48 см и 54-81 см.

С учетом темпов размыва островных массивов в Якутском расширении, равных 9,34 тыс. м²/год, была проведена оценка объемов поступления органики в русло реки Лены. В зависимости от размываемого горизонта почв, темпы поступлений органики при отступлении берегов могут составить от 2,7 до 11,9 м³ в год. Наибольшие объемы органического вещества при подмывании и разрушении берегов будут давать горизонты, находящиеся на глубине 54-60 и 75-81 см (11,1-11,9 м³ в год), и отличающиеся повышенным содержанием органического вещества (4,1-4,2%). Наименьший вклад в поставку органического вещества будет иметь поверхностный горизонт (2,7 м³ в год), наиболее обедненный органикой (0,97%). В случае, если размыву подвергнется весь береговой уступ, мощностью 1,62 м, объемы поступления органического вещества могут достигнуть 306 м³ в год (рис. 2).

По данным М.В. Оконешниковой [М.В. Оконешникова, 2013], плотность сложения почв пойменного комплекса и низких надпойменных террас в центральной, прилегающей к г. Якутску, части долины р. Лены, изменяется от 0,6 до 1,1 г/см³.

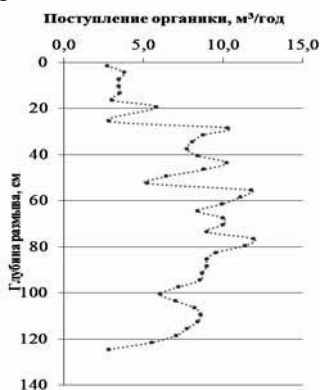


Рис. 2. Темпы поступления органического вещества в русло р. Лены при отступании берега о. Пономарев (м³/год).

Учитывая эту информацию, а также тот факт, что мощность размываемого слоя может достигать 1,62 м (высота береговых уступов над урезом реки), общий объем выноса органического вещества, рассчитанный по формуле (1), может составить от 183 до 336 т в год или 19,6-36 кг с квадратного метра размываемого берега:

$$C_F = \sum_{i=1}^n C_{\%} \times F \times h \times \rho \times 10$$

где C_F – вынос органического вещества (т/год), n – количество горизонтов в колонке почв, $C_{\%}$ – доля органического вещества в i -горизонте (%), F – темпы размыва берегов (тыс. м²/год), h – толщина почвенного горизонта (м), ρ – плотность сложения почв (г/см³).

Заключение

Появление новых массивов данных, как о характеристиках русловых деформаций, так и физических и химических свойств грунтов и речных наносов, открывает новые возможности в развитии численных методов оценки размывов берегов и изучения их проявлений в гидрологических и геохимических процессах. Предложенные в данной работе оценки на примере р. Лены иллюстрируют некоторые направления этих исследований. Их развитие в дальнейшем будет связано с усовершенствованием математических алгоритмов и внедрением методов машинного обучения и искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

Иванов В.А., Чалов С.Р. Оценка баланса наносов рек Обь и Енисей // Геоморфология. 2021. № 3. С. 79-89.

Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 415 с.

Куракова А.А., Чалов С.Р. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2019. С. 34-47.

Оконешникова М.В. Современное состояние и прогноз изменений почв долины средней Лены (Центральная Якутия) // Вест. Томск. ун-та. Биология. 2013. Т. 3. № 23. С. 7-18.

Чалов С.Р., Ефимов В.А. Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. Т. 5. С. 91-103.

Chalov S., Prokopenko K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 22. P. 4549.

Gautier E., Dépret T., Caverio J., Costard F., Virmoux C., Fedorov A., Konstantinov P., Jammet M., Brunstein D. Fifty-year dynamics of the Lena River islands (Russia): Spatio-temporal pattern of large periglacial anabranching river and influence of climate change // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 783.

Hasholt B., Bobrovitskaya N., Bogen J., McNamara J., Mernild S.H., Milburn D., Walling D.E. Sediment transport to the Arctic Ocean and adjoining cold oceans // Nordic Hydrology. 2006. Vol. 37. № 4-5. P. 413. 9.

Magritsky D. V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector // Polarforschung. 2018. Vol. 87. № 2. P. 177-194.

ArcticDEM; A Publically Available, High Resolution Elevation Model of the Arctic. 2016.

Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. 12.

Strauss J. et al. Circum-Arctic Map of the Yedoma Permafrost Domain // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 9.

Н. Н. Назаров, И. В. Фролова
*Пермский государственный национальный
исследовательский университет*

ТИПЫ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И ЭСТЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕРЕГОВЫХ ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Применение научных знаний и разработок при оценке и типизации природных объектов в процессе создания туристского продукта в последние годы все чаще становятся важнейшим элементом в привлечении людей к путешествию, знакомству с новыми территориями [Борсук, Тимофеев, 2000; Бредихин, 2010; Мишурицкий, Бредихин, 2020]. Используя наработки географов (ландшафтоведов, геоморфологов, гидрологов и др.), полученные с использованием инструментов и методов цифровой географии, организаторами туров уже сегодня предлагается ранее недоступная для потенциальных туристов информация о природных объектах, условиях прохождения маршрута и т.д. Эти сведения касаются генезиса, истории формирования природного объекта, комфортности и безопасности путешествия, «глубины» впечатлений и некоторых других природных или психоэмоциональных характеристик.

Рассматривая возможности и перспективы привлечения специальных знаний о русловых процессах в продвижении (рекламе) и/или организации речных туров, следует иметь ввиду, что многообразие рек, заключающееся в индивидуальных особенностях их гидрологических характеристик, геоморфологии берегов, спектре прибрежных ландшафтов, наличии/отсутствии опасностей различных видов, как правило, связано с морфологическими и морфометрическими характеристиками русел и их местоположением в речной долине. Данное обстоятельство позволяет и делает перспективным рассмотрение возможности использования результатов типизации русел в оценке (ранжировании) привлекательности водных маршрутов или выбора реки для сплава потенциальными туристами на основании существующих классификаций, интегрирующих в себе значительную часть ее «особенностей».

Кроме комфортности и безопасности прохождения маршрута важное место в ряду предпочтений, предъявляемых туристами-водниками к реке (участку реки), занимает эстетическая привлекательность береговых природных комплексов (БПК), которые окружают путешественника во время сплава. Оценить возможности использова-

ния классификации русел при ранжировании рек по эстетической привлекательности стало целью данного исследования.

Классификацией, в наибольшей степени удовлетворяющей задачам оценивания эстетической привлекательности сплавных маршрутов, по нашему мнению, является морфодинамическая классификация русел рек МГУ [Чалов, 1987; Чалов, Алабян и др., 1998]. Данный вывод обосновывается высокой степенью вариативности морфологии, морфометрии и расположения русла и его элементов (крылья и вершины излучин, прямолинейные вставки, острова, узлы слияния и др.), используемых в классификации в качестве критериев типологической дифференциации. Именно морфолого-морфометрические особенности русла и их взаимоположение по отношению к элементам дна речной долины, определяют различия в протяженности и разнообразии береговых природных комплексов, наполняющих видеоряд туриста-сплавщика при прохождении водного маршрута.

Изучению вопросов теории и практики проведения оценочных работ по определению степени привлекательности и эстетичности природных комплексов посвящен целый ряд публикаций [Багрова, 1971; Меллума, Хелмане, 1972; Веденин, Филлипова, 1975; Колбовский, 1999; Николаев, 1999; Назаров, Постников, 2002; Фролова, Екимова, 2016]. Анализ приведенных исследователями выводов о «механизме» влияния факторов эстетической привлекательности пейзажа на рекреационный потенциал территории показал, что практически во всех работах, где территории оценивались как объект туризма, говорилось о ведущей роли фактора природного *разнообразия* геосистем. В работах отмечается, что путешествия (туристские поездки) воспринимаются туристами и рекреантами тем благоприятнее, чем больше *контрастных* пейзажных переходов встречается по ходу маршрута или в пределах прямой видимости пассивного отдыхающего.

Исследований, касающихся изучения эстетических свойств БПК, которые у участников сплава обычно находятся в пределах прямой видимости, сравнительно немного [Загидуллина, 1999; Колбовский, 2006]. Отмечается, что высокая степень внутреннего и внешнего разнообразия прирусловых участков обусловлена их мелкоконтурностью, а размерность контуров в свою очередь зависит от соотношения эрозионных и аккумулятивных образований. На примере рек Приморья было показано, что максимальным разнообразием отличаются долины верхнего и среднего течения в пределах горных районов. При выходе на предгорные равнины долинные ландшафты подчиняются уже зональному нивелированию, утрачивают мелкоконтурность, контрастность, экзотичность, что в совокупности с равнинными характеристиками течения уже не способствует их рекреационному восприятию.

Поиск и выявление связей между типологией русел и эстетической привлекательностью водного маршрута в целом или в пределах отдельных его участков, следует начать с рассмотрения вопроса о роли геолого-геоморфологических условий, в которых происходит развитие русловых деформаций в речной долине. Необходимо отметить, что для широкопойменных и адаптированных русел разнообразие БПК и частота их контрастных переходов (границ ландшафтных урочищ, подурочищ) в значительной степени связаны с особенностями развития пойменных геосистем. У рек же с врезанным руслом, у которых пойма может иметь лишь зачаточные формы или совсем отсутствовать, уже не пойменная терраса, а *склоны* (уступы) речной долины и/или надпойменных террас становятся основными элементами оценивания привлекательности путешествия, определяющими степень дифференцированности пейзажа. Очевидно, что если рассматривать весь маршрут, то разнообразие и частота встречаемости пойменных и/или склоновых урочищ, приведенные к единице длины (например, 1 км), и могут являться *одним из* критериев привлекательности данного участка реки в эстетическом плане.

Возможности применения морфодинамической классификации русел для оценки привлекательности берегов рек были апробированы на одном из рисунков в монографии Р.С. Чалова с соавторами [Чалов, Алабян и др., 1998], в котором нашли отображение плановые очертания крупных и средних рек Европейской части России, а также основные геоморфологические элементы речных долин (рис. 1).

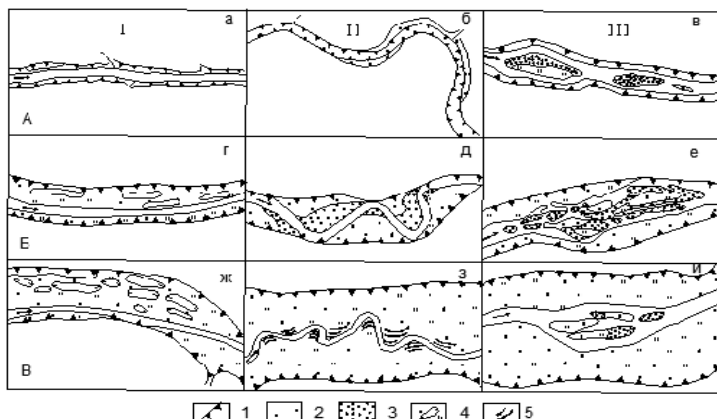


Рис. 1. Морфодинамические типы русел в разных геолого-геоморфологических условиях развития русловых деформаций (по Р.С. Чалову, А.М. Алабяну и др., 1998).

А – врезанные, Б – адаптированные, В – широкопойменные. I – относительно прямолинейные, неразветвленные, II – извилистые (меандрирующие), III – разветвлен-

ные на рукава. Примеры русел: *a* – р. Юг у с. Васильево; *б* – р. Поной у впадения р. Лопенярки; *в* – р. Сухона у г. Тотмы; *г* – р. Дон у с. Куляшовки; *д* – р. Гауя у г. Цесиса; *е* – р. Северная Двина выше впадения р. Ваги; *ж* – р. Ока у г. Шурово; *з* – р. Жиздра у с. Павлово; *и* – р. Печора у с. Великановысочного. 1 – борта долины, 2 – пойма, 3 – крупные отмели, обсыхающие в межень, 4 – озера на пойме, 5 – гривистый рельеф на пойме.

В таблице 1 на этом примере представлены результаты подсчета количества контрастных пейзажных переходов, происходящих вдоль русла при его пересечении (соприкосновении) с пойменными урочищами (гривистым рельефом, озерами), крупными отмелями, бортами долины. Данный показатель в первом приближении характеризует эстетическую привлекательность БПК каждой из рек. При всей схематичности отображения долинных геосистем на рисунке, общая тенденция формирования эстетических свойств по признаку «контрастных пейзажных переходов» выглядит достаточно определенно. Из морфодинамических типов русел лидером по количеству их контактов с БПК стали извилистые (меандрирующие) русла (8/29), далее по нисходящей за ними следуют разветвленные (8/19) и относительно прямолинейные (6/10). Анализ геолого-геоморфологических условий формирования русел как фактора формирования контрастных переходов и разнообразия в наборе долинных геосистем показал, что в эстетическом плане врезанные и адаптированные русла по своей привлекательности значительно превосходят широкопойменные. Объяснить это можно удаленностью широкопойменных русел от склонов долины, что делает их более однообразными в плане набора ландшафтных урочищ (подурочищ, групп фаций) вдоль русловых бровок.

Таблица 1. Количество контрастных пейзажных переходов и типов береговых геосистем на берегах рек с руслами, относящимися к разным морфодинамическим типам в разных геолого-геоморфологических условиях

	I	II	III	Σ
A	3/8*	3/6	3/6**	9/20
Б	1/–	3/15	3/9**	7/24
B	2/2	2/8	2/4**	6/14
Σ	6/10	8/29	8/19**	

Примечание. В числителе – количество типов береговых геосистем; в знаменателе – суммарное количество пейзажных переходов по обоим берегам реки: А – врезанные, Б – адаптированные, В – широкопойменные. I – относительно прямолинейные, неразветвленные, II – извилистые (меандрирующие), III – разветвленные на рукава. * с учетом геосистем в устьях притоков, ** учитывался один из рукавов

Для проверки сделанных выводов, которые не учитывают масштабов отображения всей ситуации, касающейся русла и геоморфологических элементов речной долины, аналогичные расчеты были проведены для рек Пермского края. Использование космических снимков с известным масштабом «картинки» (1:20000) позволило оценить разнообразие и частоту встречаемости БПК вдоль русла и сделать заключение о степени эстетической привлекательности морфодинамических типов русла по этим показателям. Результаты подсчетов контрастных переходов берегового пейзажа приведены к протяженности маршрута длиной в 1 км (табл. 2).

Таблица 2. Среднее количество контрастных пейзажных переходов и типов береговых геосистем у русел, относящихся к разным морфодинамическим типам в разных геолого-геоморфологических условиях на 1 километр маршрута

	I	II	III	Σ
A	1/0,33	2/1,00	5/3,00*	8/4,33
B	3/1,54	5/3,44	2/3,33*	0/8,31
B	3/2,92	2/0,64	2/2,00*	7/5,56
Σ	7/4,79	9/5,08	9/8,33*	

Примечание. В числителе – количество типов береговых геосистем; в знаменателе – суммарное количество пейзажных переходов по обоим берегам реки. А – врезанные, Б – адаптированные, В – широкопойменные. I – относительно прямолинейные, неразветвленные, II – извилистые (меандрирующие), III – разветвленные на рукава. * учитывался один из рукавов

Анализ значений количества (К) пейзажных переходов, относящихся к разным морфодинамическим типам русла, показал, что стабильно высокие средние значения данного показателя ($2,00 < K < 3,33$) относятся к разветвленным руслам, наименьшие – к относительно прямолинейным ($0,33 < K < 2,92$). Для первых суммарное значение показателя, определенного для всех геолого-геоморфологических условий, составляет 8,33, для вторых – всего 4,79.

При разнообразии значений пейзажных переходов в разрезе геолого-геоморфологическим условий развития русловых деформаций, их количественный разброс для адаптированных русел находится в интервале 1,54-3,44. Для данного типа русел зафиксированы и наивысшие суммарные значения этого показателя – 8,31. Наименьшим же суммарным значением (4,33) отметились врезанные русла.

Таким образом, при сравнении отдельных групп русел по степени эстетической привлекательности, представленных в таблицах 1 и 2, к аутсайдерам по значениям данного показателя относятся относительно прямолинейные неразветвленные русла, которые в обоих случаях харак-

теризуются минимальными значениями. Лидером по количеству пейзажных переходов, а, следовательно, и по эстетическому восприятию БПК в обеих выборках выступают русла, разветвленные на рукава. По признаку геолого-геоморфологических условий развития русловых деформаций, безусловными лидерами в обеих выборках выступили адаптированные русла, которые в большинстве вариантов группировки по морфодинамическому принципу имели максимальные значения по количеству контрастных пейзажных переходов.

Таким образом, проведенные исследования показали наличие связи между эстетической привлекательностью берегов и их принадлежностью к определенному морфодинамическому типу русла. Установлено, что более высокой степенью эстетической привлекательности береговых комплексов отличаются русла, разветвленные на рукава, наименьшей – относительно прямолинейные. Среди геолого-геоморфологических условий наиболее привлекательными в плане эстетического восприятия при проведении туристического сплава являются адаптированные русла; врезанные и широкопойменные русла характеризуются пониженной атрактивностью.

В заключение можно констатировать, что использование морфодинамической классификации речных русел МГУ, может оказать существенную помощь в объективной оценке эстетической привлекательности БПК, и тем самым содействовать предоставлению ценной информации по привлекательности сплавных маршрутов.

ЛИТЕРАТУРА

Багрова Л.А. Опыт характеристики пейзажного разнообразия Природных комплексов юго-восточной части горного Крыма // Проблемы географии Крыма. Симферополь, 1971. С. 80-84.

Борсук О.А., Тимофеев Д.А. Привлекательность как критерий эстетической геоморфологии // Геоморфология на рубеже XXI века: Четвертые Щукинские чтения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 124-126.

Бредихин А.В. Рекреационно-геоморфологические системы. Смоленск: Ойкумена, 2010. 328 с.

Веденин Ю.А., Филипова Л.С. Опыт выявления и картирования пейзажного разнообразия природных комплексов // Географические проблемы организации отдыха и туризма. Вып. 2. М. 1975. С. 39-48.

Загидуллина А. Эстетические аспекты рекреационной привлекательности рек горного Приморья // Приморье – XXI век. Владивосток: Изд-во ДВГУ. 1999. С. 17-18.

Колбовский Е.Ю. Культурный ландшафт и экологическая организация территорий регионов (на примере Верхневолжья). Автореф. дис...докт. геогр. наук. Воронеж. 1999. 50 с.

Колбовский Е.Ю. Экологический туризм и экология туризма. М.: Академия. 2006. 256 с.

Меллума А.Ж., Хелмане М.А. К вопросу об оценке эстетических ресурсов ландшафтов // Охрана природы в Латвийской ССР. Рига: Зинатне. 1972. С. 39-46.

Мишурицкий Д.В., Бредихин А.В. Рекреационно-геоморфологическое информационное обеспечение туристической деятельности // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 4. С. 42-50.

Назаров Н.Н., Постников Д.А. Оценка пейзажно-эстетической привлекательности ландшафтов Пермской области для целей туризма и рекреации // Изв. РГО. 2002. Т. 134. Вып. 4. С. 61-67.

Николаев В.А. Эстетическое восприятие ландшафта // Вест. Моск. ун-та. Сер.5. География. 1999. С. 10-15.

Фролова И.В., Якимова Л.В. Оценка эстетической привлекательности береговых геосистем водохранилищ // Географический вестник. 2016. № 1 (36). С. 36-48.

Чалов Р.С. Принципы типизации, морфология и деформация русел равнинных рек // Эрозионные и карстовые процессы на территории центра Русской равнины. М. 1987. С. 3-27.

Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС. 1998. 288 с.

ТРАНСГРЕССИВНАЯ ЭРОЗИЯ РУСЛА РЕКИ БЕЛОЙ

Развитие судоходства и водных путей р. Белой, входящей в Единую глубоководную систему Европейской части России, продолжается более 150 лет. Комплексное улучшение судоходных условий было начато в 30-е годы прошлого века. Глубина судового хода 0,5-1,0 м обеспечивались выборочным дноуглублением для выравнивания глубин и русловыправительными работами. В навигацию 1937 г. (создание «Камводпути») объем транзитного дноуглубления на участке Уфа-устье составил 620 тыс. м³. За период 1937-1939 гг. было построено 52 капитальных выправительных сооружения. Благодаря этому глубина судового хода в нижнем течении Белой была увеличена с 95 до 120 см.

С навигации 1950 г. на участке Уфа-устье Белой впервые были установлены гарантированная глубина судового хода 140 см и отметка проектного уровня +15 см от «0» графика г.п. Уфа, соответствовавшая отметке «0» графика г.п. Бирск.

Резкое увеличение объемов речных перевозок и появление новых крупнотоннажных судов потребовали соответствующего увеличения габаритов судовых ходов. В 1965 г. в соответствии с утвержденной генеральной схемой улучшения условий судоходства за счет строительства более 300 русловыправительных сооружений и увеличения объемов дноуглубления на участке Уфа-Бирск до 1415 тыс. м³ была достигнута гарантированная глубина судового хода 200 см от проектного уровня воды.

В 1968 г. на основе анализа большого массива данных нивелировок рабочих уровней воды за период 1955-1967 гг. была впервые выявлена «посадка» низких меженных уровней по г.п. Уфа в 35 см. Наибольшее снижение отмечено в 1961-1963 гг., когда резко возросли объемы добычных работ в черте г. Уфы на участке от устья р. Уфы до н.п. Дежнево.

Учитывая, что в 1955-1961 гг. стабильной отметке «0» графика г.п. Бирск соответствовала отметка +24 см от «0» графика г.п. Уфа, было принято решение о понижении с навигации 1968 г. отметки проектного уровня по г.п. Уфа на 25 см (до -10 см от «0» графика).

В связи с тем, что дальнейшее увеличение гарантированных глубин требовало значительного увеличения объемов дноуглубительных работ, отраслевыми научными учреждениями (ЦНИИЭВТ, ЛИВТ, Ленгипроречтранс, ВГАВТ) были выполнены исследования изменений руслового режима, даны рекомендации по организации путевых работ

Ретроспективным анализом, выполненным МГУ по результатам натуральных исследований 1994-1998 гг. [Беркович и др., 1999], было установлено, что уровни по г.п. Уфа начали снижаться с 1950-х гг., к 1965 г. величина их «посадки» составила 50 см, к 1982 г. – 125 см и к 1995 г. достигла 170 см, в том числе за счет дноуглубительных работ 20 см (около 10%), что соответствует расчетам, сделанным при обосновании проектных решений по увеличению гарантированных глубин судового хода. Максимальная скорость снижения уровней достигала 7 см/год.

За этот период в районе д. Первушино (90 км от устья р. Уфы) «посадка» низких меженных уровней составила 80 см. По г.п. Бирск при наличии циклических колебаний, связанных с изменением водности и стока наносов р. Белой, «посадка» уровней не зафиксирована.

По мере смещения основных районов добычи от г. Уфы вниз по течению реки «волна» понижения меженного уровня к 1965 г. продвинулась до района н.п. Благовещенска (70 км от Уфы) и к 1995 году в район Печенкино (150-й км). Скорость перемещения «волны» составляла 2-3 км в год.

Впереди «волны» трансгрессивной эрозии, непосредственно за зоной понижения уровней, наблюдалось интенсивное отложение наносов, возникших в процессе трансгрессивной эрозии русла, обусловленной предшествующей разработкой карьеров. Это приводило к значительному увеличению объемов дноуглубительных работ по расчистке судовых ходов на этих участках.

В исследовании МГУ также было отмечено понижение за рассматриваемый период меженных уровней воды на пригородных участках рек Уфа и верхняя Белой, обусловленное как разработкой местных русловых карьеров, так и регрессивной эрозией русла вследствие многолетней добычи НСМ на участках, расположенных ниже устья р. Уфы. К сожалению, по ряду причин научные исследования на верхних участках рек не были завершены и более детальный анализ «посадки» уровней сделать не представляется пока возможным.

По результатам исследований МГУ были даны рекомендации по категорическому исключению добычных работ на участке выше д. Первушино, а также по ограничению размеров карьеров, их местоположения и объемов ежегодной добычи на нижерасположенном участке.

Для частичной компенсации «посадки» меженных уровней воды в 1976-1980 гг. выполнено поэтапное понижение отметки проектного уровня воды по г.п. Уфа от -30 см до -70 см с соответствующим понижением отметок дна судового хода. Это привело к необходимости уве-

личения ежегодного объема дноуглубительных работ на участке до 4500 тыс. м³. Полная компенсация «посадки», достигавшей в эти годы 100-120 см, была невозможной из-за недостаточности бюджетного финансирования и технических средств.

В связи с резким сокращением бюджетного финансирования на содержание водных путей начиная с 1992 г. путевые работы на р. Белой были сокращены в несколько раз: объемы дноуглубления уменьшились с 4200 до 800 тыс. м³, выправления – с 450 до 117 тыс. м³. В результате к 1995 г. гарантированная глубина судового хода снизилась от 225 до 180 см.

В условиях продолжающегося дефицита бюджетного финансирования для выравнивания глубин и обеспеченности проектного уровня были изменены его отметки: по г.п. Бирск в 2007 г. они повышена от 0 до +20 см, по г.п. Уфа в 2008 г. – понижены от -70 до -80 см относительно «0» графиков.

В связи с продолжительным периодом маловодья, начавшегося в 2009 г., когда глубины на перекатах снижались до 145-150 см, резко сократилась загрузка нефтеналивного флота и прекращено движение пассажирских судов, нами было инициировано выполнение научно-исследовательских работ для обеспечения габаритов пути с гарантированной глубиной не менее 2,0 м на участке р. Белая г. Уфа – д. Груздевка. Работа была выполнена в 2018 г. силами лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ по госконтракту с Росморречфлотом. В отчете о выполненных исследованиях и сделанной на их основе публикации [Турыкин, Беркович и др., 2019] приведены следующие основные результаты:

1. На участке от г. Уфы до д. Груздевки русло остается нестабильным в плане. Средние скорости размыва пойменных берегов составляют 3-4 м/год. Продолжаются вертикальные деформации русла.

2. За период 1994-2017 гг. средняя глубина русла по тальвегу для всего участка увеличилась на 0,2 м, в том числе на участке выше с. Кушнареново (150 км от устья р. Уфа) на 0,52 м (2 см/год).

3. Сравнение кривых связи расходов и уровней воды за 1988 и 2015 гг. по г.п. Уфа показало снижение меженных уровне на 50 см (2 см/год).

4. Продолжение трансгрессивной эрозии русла со смещением нижней границы зоны в район с. Питяково (176 км от устья р. Уфа).

5. На участке от с. Питяково до г. Бирска отмечаются разнонаправленные русловые деформации. В створе г.п. Бирск минимальные уровни оставались относительно стабильными.

6. Основной причиной незатухающего характера трансгрессивной эрозии русла является дефицит руслообразующих наносов из-за маловодности навигаций 2009-2017 гг. и перехвата наносов вышерасположенными протяженными карьерными участками.

На основании рекомендаций МГУ разработан генеральный план выправления русла р. Белой и составлен план действий по реализации результатов НИР, утвержденный Росморречфлотом и включающий в себя:

1. Поэтапное понижение отметок проектных уровней воды по опорному г.п. Уфа от -80 до -120 см, по г.п. Бирск от +20 до 0 см относительно «0» графиков для приведения их к нормативам и увеличения фактических глубин.

2. Пополнение состава технического флота двумя земкараванами.

3. Увеличение гарантированной глубины судового хода от 190 до 220 см.

В рамках реализации первого этапа плана действий с навигации 2021 г. для выравнивания и увеличения глубин на участке г. Уфа – г. Бирск отметка проектного уровня по г.п. Уфа понижена от -80 до -100 см. С навигации 2022 г. гарантированная глубина судового хода на участке г. Уфа – д. Груздевка увеличена от 190 до 200 см.

Маловодье последних трех навигаций и обострившиеся в связи с этим проблемы поддержания судоходных глубин вынудили нас самостоятельно продолжить изучение проблемы «посадки» уровней воды на р. Белой. С этой целью был на 12 лет продлен ряд данных о минимальных уровнях воды по г.п. Бирск (рис. 2). Их анализ показал увеличение продолжительности маловодных и многоводных циклов, прерываемых в отдельные годы противоположными процессами.

Анализ построенных графиков обеспеченности проектных уровней воды по г.п. Уфа и г.п. Бирск нарастающим итогом с 1967 г. по настоящее время (рис. 3) показал, что на фоне циклических колебаний величин изменения водности навигаций прослеживаются отчетливо выраженные тенденции.

По г.п. Уфа отмечается усилившаяся в последние 12 маловодных лет тенденция снижения обеспеченности проектных уровней, что свидетельствует о продолжении «посадки» низких меженных уровней воды. По г.п. Уфа за прошедшие 56 лет обеспеченность отметки уровня -80 см снизилась с 94 до 78,3 %. За последние 12 лет обеспеченность отметки уровня -100 см по г/п Уфа снизилась с 92 до 87,19 %.

Минимальные уровни по г/п Бирск за 1961-2022 г.г.

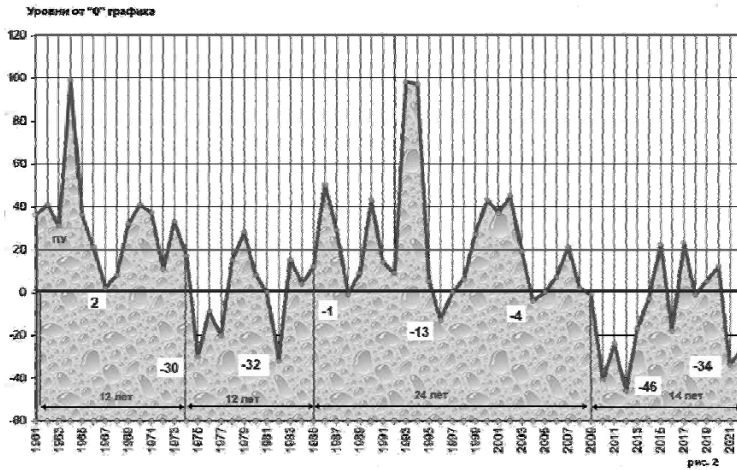


Рис. 2. Минимальные уровни воды по г.п. Бирск

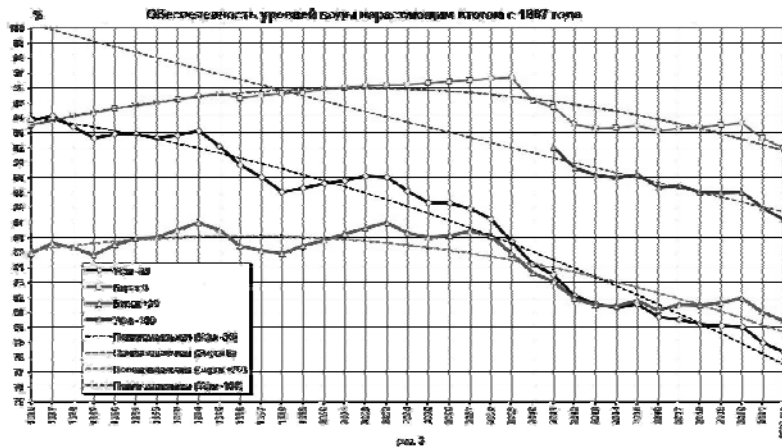


Рис. 3. Динамика обеспеченности уровней воды

По г.п. Бирск за прошедшие 56 лет обеспеченность отметки уровня +20 см вначале до 2003 г. повысилась с 84,9 % до 87 %, а затем снизилась до 80,3 %. Обеспеченность отметки рекомендованного проектного уровня 0 см в период до 2009 г. увеличилась с 93,5 до 96,7 %, а затем снизилась до 91,96%.

Учитывая это обстоятельство, был построен совмещенный график наинизших навигационных уровней по г.п. Уфа и г.п. Бирск за период

1967-2022 гг. и интегральная кривая разностных минимальных уровней (рис. 4).

Поскольку «посадка» уровней воды по г.п. Бирск отсутствовала, данная кривая отражает «посадку» уровней по г.п. Уфа за рассматриваемый период. Анализ тренда этой зависимости показывает, что стабилизация наинизших уровней воды по г.п. Уфа, выявленная в 2010 г., носила временный характер. За маловодный период 2011-2022 гг. «посадка» уровней относительно г.п. Бирск составила 11 см (1 см/год). Снижение обеспеченности проектного уровня по г.п. Бирск на величину около 10 см соответствует тенденции, выявленной МГУ [Турыкин, Беркович и др., 2019]. В этом случае «посадка» низших меженных уровней по г.п. Уфа за рассматриваемый период составляет 20 см, что также соответствует данным МГУ.

Выполненный расчет обеспеченности уровней воды по г.п. Уфа и г.п. Бирск за период 25 лет (1998-2022 гг.) показал, что обеспеченность рекомендованной МГУ отметки проектного уровня по г.п. Уфа 120 см за последние 4 года снизилась от 90 до 86,62% и требует внесения изменений в План действий по реализации результатов исследований МГУ.

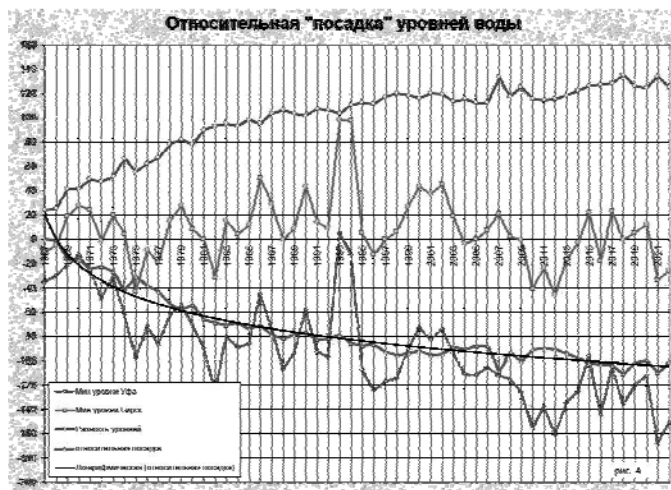


Рис. 4. Относительная «посадка» уровней воды

Анализ планов русловых съемок участка г. Уфа–г. Бирск за 2019-2022 гг. показал, что на всех перекатах наблюдается размыв русла в границах судового хода, небольшие отложения наносов выявляются за его пределами и не требуют дноуглубления при существующих гаран-

тированных габаритах пути. Зона трансгрессивной эрозии русла сместилась вниз по течению по сравнению с 2018 г. еще на 40 км до г. Бирск (рис. 5).

Основной причиной этого является отмеченное МГУ сохранение и увеличение дефицита руслообразующих наносов. В свою очередь, он объясняется перехватом наносов на вышележащих пригородных участках рек Уфы и верхней Белой, сопровождающимся врезанием русла, образованием отмостки и, как следствие, повышением его устойчивости.

Дополнительным фактором увеличения дефицита руслообразующих наносов является низкая водность навигаций, начиная с 2009 г., когда максимальные расходы воды половодья были ниже нижнего предела руслоформирующих расходов 4400 м³/с, определенного исследованиями и расчетами МГУ.

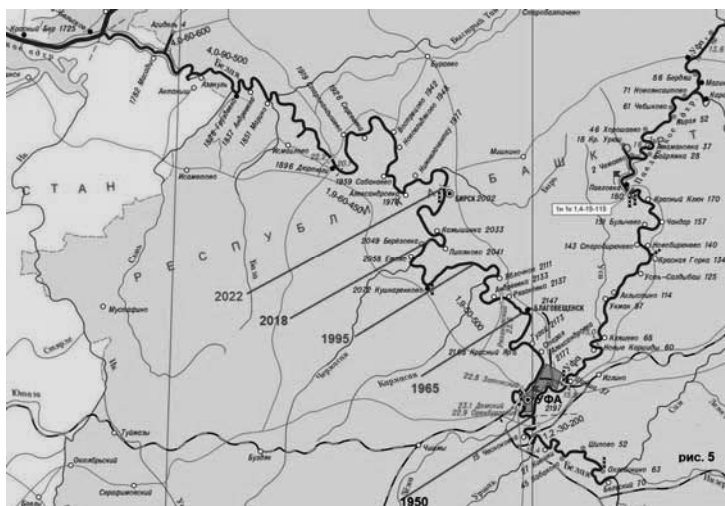


Рис. 5. Продвижение зоны трансгрессивной эрозии русла

В меньшей степени сокращению расхода наносов способствует увеличение на реках Уфе и Белой в черте г. Уфы количества и размеров пойменных карьеров ПГС, имеющих гидравлическую связь с основным руслом (18 карьеров). Помимо перехвата в половодье части взвешенных наносов эти боковые емкости русла, выполняя роль гидроаккумуляторов, сглаживают колебания уровней воды.

Выводы

1. Продолжение незатухающей трансгрессивной эрозии русла на участке Уфа – Бирск обуславливает активизацию процесса «посадки» уровней по г/п Уфа и начало «посадки» уровней по г/п Бирск.

2. Сохранение дефицита руслообразующих наносов и трансгрессивной эрозии русла способствует сокращению объемов дноуглубительных работ на участке Уфа – Бирск.

3. Запрет на разработку русловых карьеров НСМ должен быть распространен на участок р. Белая Первушино – Бирск.

4. При общем объеме добычи из русла р. Белая аллювия более 100 млн. м³ и годовом стоке руслоформирующих наносов 300-370 тыс. т для восстановления первоначальных параметров русла потребуется несколько сот лет.

Предложения

1. Продолжить мониторинг русловых процессов на участке р. Белой г. Уфа – д. Дюргюли.

2. Внести в План действий по реализации результатов НИР изменения в части понижения отметки проектного уровня воды по г.п. Уфа до -130 см относительно «0» графика и корректировки объемов дноуглубительных работ.

ЛИТЕРАТУРА

Барышников Н.Б., Беркович К.М., Гареев А.М. Развитие русла Нижней Белой в условиях антропогенной нагрузки // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 3. М.: МГУ. 2000.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019.

Турыкин Л.А., Беркович К.М., Ботвин Д.В., Злотина Л.В., Калюжный В.К., Краснов С.Ф., Михайлова Н.М., Сурков В.В. Исследование гидрологического и руслового режима Нижней Белой и обоснование рекомендаций по коренному улучшению судоходных условий // Макавеевские чтения – 2019. М.: Географ. ф-т МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020.

Г.Л. Гладков¹, В.М. Католиков²

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, ²Государственный гидрологический институт

ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СУДОХОДСТВА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ НИЖЕГОРОДСКОГО ГИДРОУЗЛА НА РЕКЕ ВОЛГЕ

Линейные тренды изменения минимальных расходов и уровней воды

Анализ данных многолетних наблюдений за речным стоком Волги в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла показал, что в течение всего периода эксплуатации гидроузла имеет место устойчивое увеличение максимальных, средних и минимальных значений расходов воды в навигационные периоды времени: минимальный расход воды за это время в нижнем бьефе увеличился, в среднем, на величину около 230 м³/с. Рост минимальных расходов воды в нижнем бьефе отчасти компенсирует происходящее понижение отметок свободной поверхности.

На рис. 1 приведены совмещенные хронологические графики минимальных навигационных уровней воды на гидрологических постах р. Волги (вдхр. Чебоксарское) – Нижний бьеф ГЭС, г. Городец, г. Балахна, г. Сормово, г. Нижний Новгород за период 1957-2022 годы.

На гидрологических постах Нижний бьеф ГЭС, г. Городец и г. Балахна отчетливо прослеживается тренд на понижение минимальных уровней воды за весь период наблюдений. На нижерасположенном участке в районе Сормово и Нижнего Новгорода понижения средних и минимальных уровней воды по данным наблюдений в среднемноголетнем разрезе не наблюдается. Минимальные навигационные уровни в нижнем бьефе гидроузла имеют устойчивый тренд на понижение со средней интенсивностью 1,7-1,8 см/год.

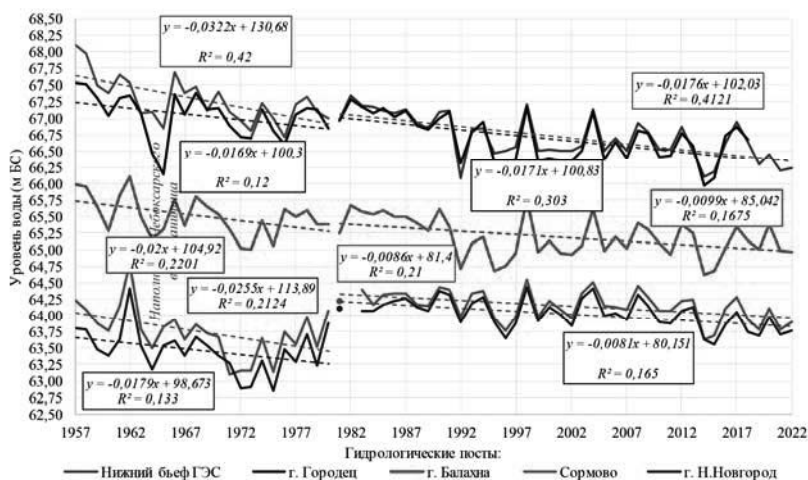


Рис. 1. Хронологические графики минимальных уровней воды за период навигации на р. Волге (вдхр. Чебоксарское) – Нижний бьеф ГЭС, г. Городец, г. Балахна, г. Сормово, г. Нижний Новгород за период 1957-2022 г.

Сбросные расходы, скорости течения и уровни воды в нижнем бьефе

Кинематическая структура потока и динамика морфологических изменений в нижнем бьефе гидроузла [Гришанин, 1979; Бабинский и др., 2013; Гладков и др., 2023] в условиях недельного и суточного регулирования речного стока представляют собой сложную картину. В нижнем бьефе отсутствует однозначная связь между расходами и уровнями воды. При прохождении волны пуща наступление максимумов скорости течения воды, расхода воды и уровня воды не совпадают по времени. Волна пуща расплывается по мере распространения от створа гидроузла вниз по течению реки. При этом величина пускового расхода воды и высота волны пуща по длине реки уменьшаются.

Регулирование стока р. Волги сооружениями Нижегородского гидроузла осуществляется в соответствии с действующими «Правилами ...» в интересах различных водопользователей. Главными из них являются энергетика, водный транспорт, водоснабжение и рыбное хозяйство. Рыбинское и Горьковское водохранилища используются также для уменьшения максимальных сбросных расходов воды в нижние бьефы гидроузлов при прохождении высоких половодий, для поддер-

жания в надлежащем санитарном состоянии нижнего бьефа гидроузла Горьковского водохранилища, а также для нужд сельского хозяйства и для создания зон отдыха.

Был изучен характер связи между расходами и уровнями воды в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла по данным почасовых измерений расходов и уровней воды в навигацию 2021 г. В период весенне-го паводка однозначная связь между расходами и уровнями отсутствует, а разброс точек на графике связи оказывается относительно небольшим. Влияния суточного регулирования стока в этот период нет.

Для детального изучения характера сбросных расходов в течении навигации выбраны два недельных периода, относящихся к летне-осенней межени – с 02.08 по 08.08 и осенне-зимней межени – с 27.09 по 03.10.2021. В меженный период (рис. 2) в результате влияния недельного и суточного регулирования стока воды неоднозначность связи между расходами и уровнями воды усиливается.

Анализ скоростного режима потока в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла выполнен по материалам натурных наблюдений за расходами и уровнями воды по данным почасовых измерений. По этим данным были рассчитаны средние по живому сечению скорости течения воды в створе гидрологического поста Городец. Полученные результаты показывают, что в верхней части судоходного участка, в границах сформировавшейся воронки размыва, в большом диапазоне сбросных расходов воды наблюдаются относительно небольшие скорости течения воды. На этом участке возможен ограниченный транспорт наносов в моменты прохождения пусков воды.

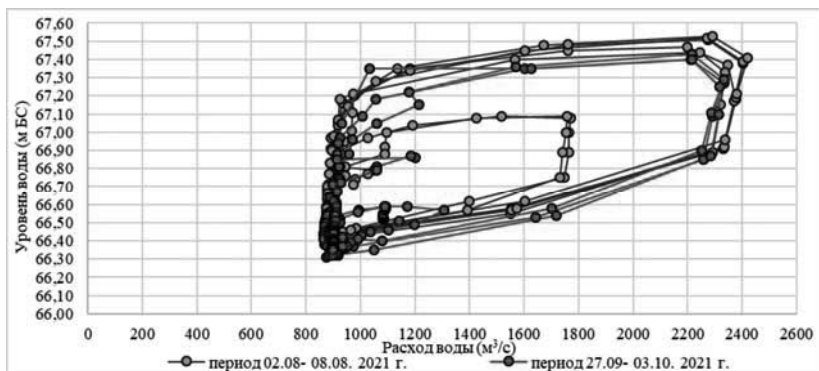


Рис. 2. График связи расходов и уровней воды в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла по данным почасовых измерений за периоды с 02.08- 08.08.2021 г.

($Q_{\text{ср. сут.}} = 1183,6 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Z_{\text{ср. сут.}} = 66,8 \text{ м БС}$) и 27.09-03.10.2021 г.

($Q_{\text{ср. сут.}} = 1067,5 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Z_{\text{ср. сут.}} = 66,6 \text{ м БС}$)

На рис. 3 приведены графики изменения средних по живому сечению скоростей течения воды в створе гидрологического поста Городец в зависимости от уровня в нижнем бьефе гидроузла для двухнедельных периодов, относящихся, соответственно, к летне-осенней межени – с 02.08 по 08.08 и осенне-зимней межени – с 27.09 по 03.10.2021.

Минимальное значение скорости течения воды в живом сечении (около 0,3 м/с) отвечает моменту окончания сбросного пуска воды на гидроузле.

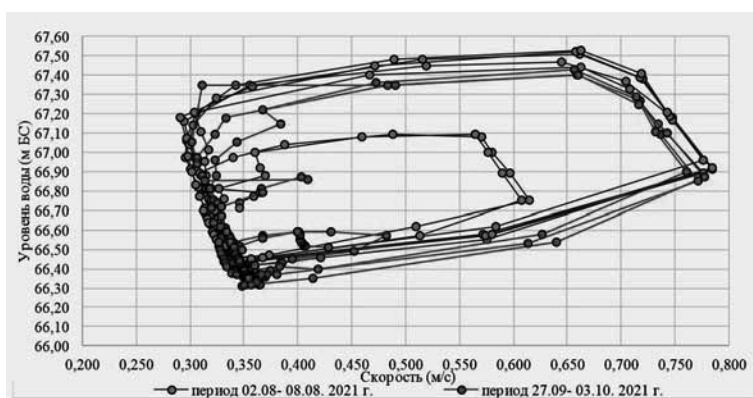


Рис. 3. Скорости течения воды в створе гидрологического поста Городец по данным почасовых измерений в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла за периоды с 02.08- 08.08.2021 г. и 27.09-03.10.2021 г.

Далее, несмотря на продолжающееся понижение уровней воды в створе поста, скорость течения начинает возрастать с небольшой интенсивностью при минимальном сбросном расходе воды и достигает значения 0,35 м/с в момент наступления самого низкого уровня воды на гидростворе. С этого момента начинается новый сбросной пуск воды и скорость течения воды интенсивно возрастает до своего максимального значения (около 0,8 м/с). Своего максимума сбросной расход воды достигает несколько позже по времени (см. рис.2).

Гидравлические расчеты скоростного режима потока по длине реки показали, что в верхней части участка от г. Городца и до створа 866 км по судовому ходу, расположенного примерно посредине между Городцом и Балахной, наблюдается общий тренд на увеличение средней скорости течения воды. В средней части участка в диапазоне сбросных расходов от 800 до 1500 м³/с скорости течения воды незначительно варьируют относительно среднего значения 0,8 м/с. В нижней части участка

на скоростной режим реки начинает оказывать влияние подпор от Чебоксарского водохранилища. Общий ход изменения скоростей течения по длине приобретает тренд на понижение.

Оценка влияния проектируемого судоходного канала в нижнем бьефе гидроузла на гидравлику потока показала, что по мере увеличения сбросного расхода воды в нижнем бьефе гидроузла скорость течения воды на судовом ходу выравнивается по длине участка. При этом на отдельных перекатах, расположенных выше г. Балахны, выполненные расчеты свидетельствуют о возможном увеличении скорости течения на судовом ходу после выполнения дноуглубительных работ. Наиболее сильно это становится заметным в верхней части судоходного участка при относительно малых расходах воды, т.е. когда снижение уровня воды в результате разработки дноуглубительной прорези проявляется в большей степени. В верхней части судоходного участка транспорт грунтов песчаной фракции будет иметь место в полосе судоходной прорези и за ее кромками во всем диапазоне изменения расходов воды.

На рис. 4 для иллюстрации скоростного режима потока в створе поста приведены хронологические график изменения расходов и уровней воды и график изменения средней по живому сечению скорости течения воды за меженно-осенний период навигации, построенные по данным почасовых измерений расходов и уровней воды. Там же дополнительно показан также график изменения величины неразмывающей скорости (по В.Н. Гончарову [1938]).

Полученные результаты показывают, что скорости течения, превышающие критические значения наблюдаются исключительно в моменты попусков воды. Причем в период осенней межени число попусков воды в неделю сокращается, что приводит к снижению общей интенсивности транспорта наносов на участке.

Уклоны свободной поверхности

По длине участка между постами Городец, Балахна, Сормово и Нижний Новгород падение уровней воды распределяется неравномерно (рис. 5).

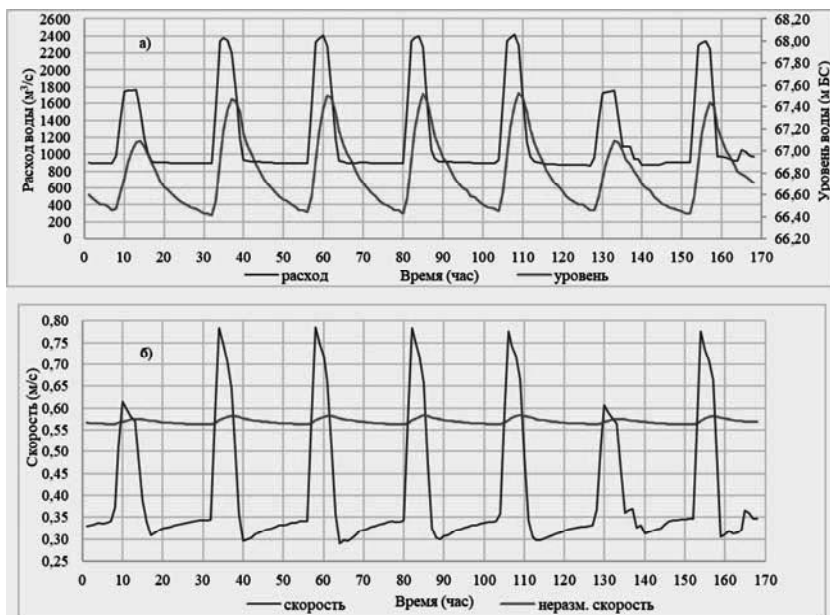


Рис. 4. Хронологические графики изменения расходов и уровня воды (а) и средней по живому сечению скорости течения воды (б) в створе г.п. Городец за период 02.08-08.08.2021 года



Рис. 5. Совмещенные хронологические графики изменения среднесуточных значений сбросных расходов воды в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла и средних значений уклонов свободной поверхности на участках: Городец-Балахна, Балахна-Сормово и Сормово-Нижний Новгород в течение навигации 2018 г.

Более высокие значения уклонов свободной поверхности наблюдаются в верхней части участка, на участке от г. Городца до г. Балахны. На участке Балахна-Сормово падение свободной поверхности в меженный период становится меньше, чем на вышерасположенном участке. На участке от Сормово до Нижнего Новгорода, вследствие влияния подпора от Чебоксарского водохранилища, уклоны свободной поверхности становятся значительно меньше, чем на вышерасположенных участках реки.

В период прохождения весеннего половодья уклоны свободной поверхности выравниваются на всем протяжении свободного участка реки Волги в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла, и составляют в среднем, 0,025-0,05‰. По мере уменьшения сбросных расходов воды при переходе к летней межени эта картина меняется. Значительная часть падения свободной поверхности воды сосредотачивается на участке от Городца до Балахны, где средние уклоны свободной поверхности до самого окончания навигации устанавливаются равными в среднем около 0,075 ‰.

Ниже по течению реки на участке от Балахны до Сормово величина падения свободной поверхности уменьшается; средние уклоны составляют около 0,05 ‰. В самом нижнем конце рассматриваемого судоходного участка от Сормово до Нижнего Новгорода уклоны уменьшаются еще в большей степени и составляют при малых сбросных расходах воды величину порядка 0,02-0,025 ‰. Эти результаты являются принципиально важными, т.к. отражают тот факт, что по длине судоходной прорези сверху вниз по течению реки степень ее влияния на гидравлику потока будет уменьшаться. При этом наибольшую величину понижения уровня воды после разработки прорези следует ожидать в верхней части участка, выше г. Балахны.

Наоборот, наименьшее влияние на положение уровней воды в результате проведения дноуглубительных работ будет иметь место в нижней части прорези на перекатах, расположенных в зоне переменного подпора от Чебоксарского водохранилища.

Деформации русла реки в нижнем бьефе гидроузла

Особенности гидравлики потока обуславливают сложный характер русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов. Наряду с фоновыми эрозионными процессами, происходящими ниже створа гидроузла, при прохождении волны пуща в русле реки с деформируемым дном наблюдается транспорт донных наносов в виде донных гряд и происходят знакопеременные деформации дна и берегов. Прогноз русловых переформирований в данных условиях и оценка устой-

чивости дноуглубительных прорезей представляют собой сложную задачу.

Анализ изменения емкости русла р. Волги в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла за период его эксплуатации, выявил значительное увеличение объема русла реки – на величину, порядка 40,6 млн. м³, что стало причиной однонаправленного необратимого снижения уровня воды на участке реки, расположенном выше границы зоны выклинивания подпора от Чебоксарского водохранилища.

Интенсивность изменения емкости русла при этом имеет асимметричный характер и в период с 1988 г. по 2004 г. достигла наибольшей величины, равной 1488 тыс. м³/год. Наименьшее значение интенсивности – 101 тыс. м³/год – наблюдалось за период 1977-1988 гг. В период с 2004 по 2017 г. емкость русла в нижнем бьефе гидроузла возрасла в среднем на 490 тыс. м³/год, не имея тенденции к затуханию.

На переформировании русла р. Волги в границах рассматриваемого участка оказывают влияние несколько факторов, основными из которых являются:

- влияние расположенной выше по течению Нижегородской ГЭС;
- влияние добычи нерудных строительных материалов (НСМ);
- влияние дноуглубительных работ.

Влияние Нижегородской ГЭС на изменение емкости русла реки заключаются в увеличении транспортирующей способности потока ниже створа гидроузла вследствие перехвата стока наносов вышерасположенным водохранилищем. В нижнем бьефе поток начинает пополнять дефицит транспорта наносов в результате размыва дна и берегов и попутного врезания русла в аллювиальные отложения. Сток воды при этом имеет резко выраженный неустойчивый характер за счет попускового режима работы ГЭС.

Анализ объемов добычи НСМ в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла показал, что за период активной разработки карьеров (1977-2004 гг.) на участке от г. Городца до г. Нижнего Новгорода на месторождениях, расположенных в русловой части р. Волги было извлечено 9,1 млн. м³ грунта, что составляет 36,6 % от общего изменения объема русла р. Волги на данном участке. С учетом того, что основные объемы добычи были сосредоточены в средней и нижней частях участка, снижение уровня воды р. Волги за счет карьерных разработок составило около 13 см в створе г.п. Балахна при расходе воды 1100 м³/с, или 10 % от общей посадки уровня воды при данном расходе воды.

Анализ динамики изменения объемов дноуглубительных работ для обеспечения судоходства показывает, что в середине 80-х годов на транзите от г. Городца до г. Нижнего Новгорода извлекалось почти

8.5 млн. м³ грунта за навигацию. В последующий период времени объемы дноуглубления существенно сократились. По длине участка объемы транзитного дноуглубления распределены неравномерно. Наибольшие объемы грунта на перекатах извлекались в средней и нижней частях участка. Выше г. Балахны объемы дноуглубительных работ на перекатах существенно меньше.

Приблизительная оценка влияния дноуглубительных работ на уровеньный режим реки была выполнена ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева в 2019 г. с использованием результатов проведенного математического моделирования. Полученные результаты показали, что влияние дноуглубительных работ оказалось незначительным, а основным фактором, оказавшим влияние на снижение уровня воды в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС, является влияние гидроузла и Горьковского водохранилища.

Полученные данные показывают, что в результате развития эрозийных процессов в нижнем бьефе гидроузла, а также проведения дноуглубительных работ и добычи нерудных строительных материалов в русле р. Волги, отметки дна на судовом ходу значительно понизились (рис. 6). При этом наиболее сильные изменения произошли в нижней части судоходного участка.

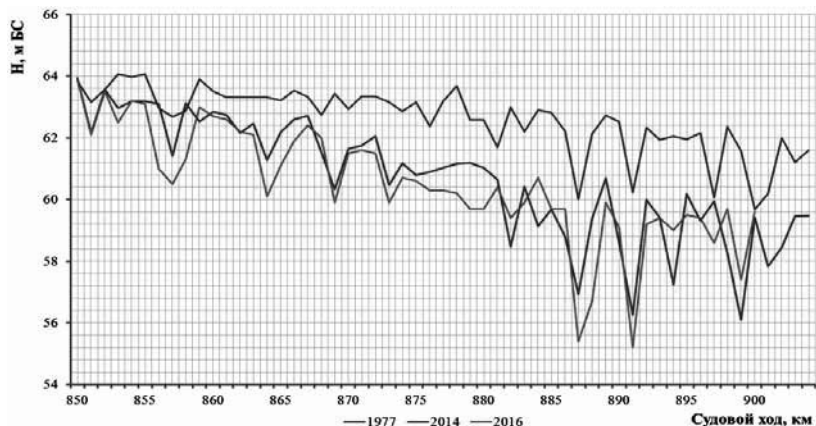


Рис. 6. Продольный профиль русла р. Волги по судовому ходу на участке от створа гидроузла (Городецких шлюзов) до г. Нижнего Новгорода

Данная ситуация обусловлена особенностями морфологии русла реки, режимом зарегулированного стока и характером инженерных мероприятий, проводимых в русле реки. Наличие трудноразмываемых пород на участке от г. Городца до г. Балахны в существенной степени

снижает интенсивность развития эрозионного процесса. В данных условиях следует ожидать ограниченных деформаций размыва русла реки на рассматриваемом участке Волги путем развития попятной эрозии, снизу вверх против течения реки.

Анализ русловых переформирований, выполненный по материалам изысканий 2017 и 2022 гг. показал, что на судоходном участке наблюдаются ограниченные деформации русла. При этом в верхней части участка, выше г. Балахны, переформирования русла практически отсутствуют. Наиболее значительные изменения дна на судовом ходу наблюдались в нижней части судоходного участка.

Эти изменения обусловлены деформациями, которые произошли вследствие сезонных переформирований русла реки за пятилетний период. Другая причина изменения отметок дна на судовом ходу обусловлена дноуглубительными работами, которые проводились на данном участке для обеспечения судоходных глубин.

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

В свою очередь, скорость движения гряд и расход наносов, в этих условиях изменяются существенно. Как показали проведенные численные эксперименты, средняя величина расхода наносов в условиях неустановившегося движения воды в меженно-осенний период времени (при организации семисуточных попусков в неделю) оказалась в два раза больше, чем при установившемся режиме стока. В осенне-зимний период при прохождении трех-четырех попусков воды из верхнего бьефа это увеличение произошло в 1,6 раза. Причина увеличения расхода наносов связана с ростом скорости перемещения гряд в моменты прохождения волны суточных попусков воды.

Влияние движения донных наносов в проектируемом судоходном канале на проходные глубины

Гидравлические и экспериментальные исследования параметров транспорта наносов и русловых деформаций на гидравлических моделях и в реках проводились преимущественно в условиях установившегося движения воды [Католиков и др., 2001; Клавен и др., 2011; Чалов, 2008, 2011; Гладков и др., 2021, 2022]. Исследования кинематической

структуры потока и русловых деформаций при неустановившемся режиме движения воды в нижних бьефах гидроузлов в последние годы проводились в ограниченных объемах. Вместе с тем, проблемы обеспечения судоходства в нижних бьефах гидроузлов, расположенных вне зоны подпора остаются по-прежнему актуальными [Гарибин и др., 2021; Schoeneich et al, 2023].

Проблеме грядового движения донных наносов в судоходных прорезях посвящено много научной и технической литературы. Большое внимание этой проблеме в свое время уделили К.В. Гришанин и Б.Ф. Сنيщенко. Основная часть результатов исследований закономерностей и параметров грядового движения донных наносов [Кондратьев и др., 1982] была получена в ходе изучения грядового движения донных наносов в судоходных прорезях.

Одним из этих результатов является установленная Б.Ф. Сنيщенко эмпирическая прямо пропорциональная зависимость высоты гряд от глубины потока. Из этой зависимости следует, что в случае появления гряд в создаваемой судоходной прорези в нижнем бьефе Городецкого гидроузла, их высота в судоходной прорези будет иметь порядок 0,5 м и более, что приведет к снижению проходной глубины.

Еще более негативное влияние на судоходство следует ожидать в результате возможного формирования и развития средних русловых форм на всем 45-километровом участке нижнего бьефа гидроузла. Анализ космических снимков современного состояния русла на данном участке показал, что в современных условиях транспорт донных наносов на участке нижнего бьефа происходит с формированием средних русловых форм речного русла (мезоформ) в виде побочной и ленточных гряд. Наличие этих средних русловых форм в речном русле Волги, в непосредственной близости от створа Городецкого гидроузла, означает, в первую очередь, что гидравлическая структура потока в нижнем бьефе соответствует гидравлическим условиям, необходимым для формирования ленточных гряд и побочной, и что в русле реки, несмотря на перехват донных наносов гидроузлом и водохранилищем, достаточно речных донных наносов для формирования средних русловых форм.

В соответствии с гидроморфологической теорией руслового процесса, разрабатываемой в ГГИ, высота средних русловых форм по их классификационному определению, соизмерима с глубиной потока на стадии руслонаполняющего расхода воды, т.е. расхода воды, проходящего в пределах пойменных бровок [Кондратьев и др., 1982]. Это означает, что после реконструкции русла р. Волги путем создания в нем судоходной прорези шириной 100 м, глубиной 4,5 м с величиной па-

раметра $B/H = 31$, в судоходной прорези будут созданы условия для формирования полноценных средних русловых форм (ленточных гряд и побочней) по всей ее длине, с высотой, соизмеримой с глубиной судоходной прорези. Иными словами, в запроектированной судоходной прорези со временем появится система средних русловых форм и, следовательно, система полноценных лимитирующих перекатов, которые полностью нарушат устойчивость судоходной прорези и станут серьезным препятствием для судоходства.

В качестве примера формирования средних русловых форм в нижнем бьефе гидроузлов при попытках сдерживать неизбежное падение уровней воды в нижних бьефах и обеспечить при этом гарантированные судоходные глубины путем стеснения потока береговыми незатопляемыми шпорами можно привести ситуацию в нижнем бьефе гидроузла на р. Висла в г. Влоцлавек (рис. 7).



Рис. 7. Побочни, сформировавшиеся в русле Вислы в нижнем бьефе гидроузла Влоцлавек на участке стеснения русла береговыми шпорами

На основе всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что проблема устойчивости судоходных прорезей и создания гарантированных судоходных условий на равнинных реках при объективно существующем грядовом иерархическом характере движения донных руслоформирующих наносов представляется чрезвычайно сложной. Решению этой проблемы российские инженеры-путейцы посвятили немало усилий начиная еще с XIX века. Из всего этого многолетнего опыта известно, что нельзя выработать какой-то единый способ регулирования механизма движения донных наносов и способа создания условий для судоходства на всех лимитирующих участках.

Для каждого конкретного лимитирующего участка требуется разработка своей уникальной схемы регулирования и не только на основе математического моделирования гидравлики потока, но и на основе изучения механизма грядового движения донных руслоформирующих наносов на каждом лимитирующем участке как в натурных, так и в лабораторных условиях путем физического моделирования этого механизма на пространственных моделях.

Оценка влияния дноуглубительных работ на положение уровней воды

Для расчёта гидродинамических параметров течения воды и русловых переформирований были выполнены гидравлические расчеты с использованием программного комплекса STREAM 2D, основанном на оригинальном численном алгоритме решения двумерных уравнений мелкой воды на неровном дне [Беликов и др., 2020]. Двумерная нестационарная система уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана) решается методом конечных элементов на нерегулярной треугольной сеточной основе.

По результатам математического моделирования величина дополнительной просадки уровней в результате разработки судоходной прорези составит порядка 20–25 см и приведет к активизации русловых переформирований на судовом ходу. В среднесрочной перспективе снижения интенсивности снижения уровней воды в нижнем бьефе гидроузла не прогнозируется.

Результаты гидравлических расчетов по оценке влияния дноуглубительной прорези в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла, выполненные при различных сбросных расходах воды в полной мере согласуются с материалами вышеприведенного анализа гидроморфологической ситуации. Полученные данные показывают, что наиболее существенное влияние на положение уровней воды окажет разработка дноуглубительной прорези на участке от г. Городца до г. Балахны. При сбросном расходе воды $1100 \text{ м}^3/\text{с}$ общая величина снижения уровня в нижнем бьефе составит 21 см. При этом относительная доля снижения уровня воды на верхнем участке (Городец-Балахна) составит 14 см (66,7% от величины снижения); на среднем участке (Балахна-Сормово) – 6 см (28, 6%) и на нижнем участке (Сормово-900.0 км) – 1 см (4,7%). При меньших значениях сбросных расходов воды относительная доля величины «просадки» на верхнем участке становится еще больше. При сбросном расходе $500 \text{ м}^3/\text{с}$ снижение уровня воды на этом участке составляет 72,2% от общей величины снижения в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла.

Основной вывод, который следует из материалов выполненного анализа данных многолетних наблюдений на стационарных гидрологических постах, а также результатов выполненных гидравлических расчетов, заключается в том, что влияние дноуглубительных работ на участке от Сормово до г. Нижний Новгород практически (в пределах точности измерений уровней воды) не скажется на положении уровней воды и не приведет к дополнительной просадке (снижению) уровня воды в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла.

Заключение

На судоходном участке р. Волги в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла условия транспорта наносов зависят от величины сбросного расхода воды. В период весеннего половодья скорости течения превышают значения неразмывающей скорости, что свидетельствует о возможности осуществления активного транспорта наносов и русловых деформаций на данном участке реки. В верхней части участка от г. Городца до г. Балахны эрозионные процессы в русле реки ограничиваются вследствие высокого залегания отметок кровли трудноразмываемых грунтов.

В меженно-осенний и осенне-зимний периоды навигации величина сбросных расходов воды через створ гидроузла уменьшается, а амплитуда их суточного колебания определяется режимом регулирования стока. Скорости течения воды на участке, расположенном в непосредственной близости от створа гидроузла, в течение суток изменяются в большом диапазоне, примерно от 0,30 м/с до 0,80 м/с. Скорости течения на судовом ходу превышают величину неразмывающей скорости течения лишь в моменты прохождения пиков суточных попусков воды из верхнего бьефа. Движение наносов на данном участке будет иметь эпизодический характер. При этом частицы грунта на дне потока будут приходить в движение в течение ограниченного периода времени, отвечающего моментам попусков, а все остальное время в течение суток донные частицы могут находиться в состоянии покоя.

В верхней части судоходного участка транспорт песчаных наносов будет наблюдаться в полосе судоходной прорези и за ее кромками во всем диапазоне изменения расходов воды. В полосе дноуглубительной прорези следует ожидать формирования устойчивого грядового рельефа за счет поступления наносов из приплотинной области и со стороны боковых откосов прорези. В нижней части судоходного участка активное перемещение наносов будет возможным при расходах воды с обеспеченностью менее 50%. При относительно малых расходах воды, отве-

чающих величине санитарного попуска, движение наносов и русловые переформирования на данном участке затухают.

В полосе прорези будут созданы необходимые гидравлические условия для формирования средних русловых форм – ленточных гряд и побочней по всей ее длине, с высотой, соизмеримой с глубиной потока в судоходной прорези. Таким образом, на судовом ходу в пределах полосы судоходной прорези возможно образование средних русловых форм и, следовательно, системы лимитирующих перекатов, которая нарушит устойчивость судоходной прорези и станет серьезным препятствием для судоходства.

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

Скорость движения гряд и расход наносов в этих условиях изменяются существенно. Как показали проведенные численные эксперименты, средняя величина расхода наносов в условиях неустановившегося движения воды в меженно-осенний период времени (при семисуточных попусках в неделю) оказалась в два раза больше, чем при установившемся режиме стока. В осенне-зимний период при трех-четырех попусках воды из верхнего бьефа это увеличение произошло в 1,6 раза. Причина увеличения расхода наносов связана с ростом скорости перемещения гряд в моменты прохождения волны суточных попусков воды.

ЛИТЕРАТУРА

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

Гладков Г.Л., Беляков П.В. Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов // Вест. Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 1. С. 52-63.

Гладков Г.Л., Католиков В.М., Беляков П.В. Параметры транспорта наносов в реках с побочневым типом руслового процесса // Вест. Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. 2022. Т. 14. № 4. С. 493-507.

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

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

Католиков В. М., Копалиани З.Д. Побочни в руслах рек: условия образования и их динамика // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 5. С. 579-586.

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

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

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

Чалов Р.С. Руслведение: теория, география, практика. Том 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.

Babinski Z., Habel M. Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower. Acta Energetica. 2013. No 15. P. 91-101.

Garibin P. et al. Innovative Proposals for Providing Navigable Depths in the Downstream of the Gorodetsky Hydraulic Unit on the Volga River // International Scientific Conference "International Transport Scientific Innovation": ITS-2021. Section: Computational transportation science, aipcp22-ar-itsi 2021-00118

Gladkov G., Habel M., Babinski Z., Belyakov P. Sediment Transport and Water Flow Resistance in Alluvial River Channels: Modified Model of Transport of Non-Uniform Grain-Size Sediments. Water 2021, 13, 2018. <https://doi.org/10.3390/w13152038>.

Schoeneich M., Habel M., Szatten D., Absalon D., Montewka J. An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways. Water 2023, 15, 141. <https://doi.org/10.3390/w15010141>.

С.А. Двинских, О.В. Ларченко
*Пермский государственный национальный
исследовательский университет*

**РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗРАБОТКИ
ПГМ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА
(НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕКАМСКОГО
И ВЕРХНЕ-ДУЛЕСОВСКОГО УЧАСТКОВ)**

Сложность изучения русловых деформаций заключается как в самой физике процесса, так и недостатке эмпирического материала наблюдений за русловыми процессами в природных условиях. Последнее связано с тем, что в отличие от наблюдений за процессами стока, не существовало и не существует развитой сети наблюдений за русловыми процессами. Имеющийся эмпирический материал, как правило, ограничен во времени и в пространстве, а его объем сильно варьирует для разных рек. Многообразие форм и направленность деформационных процессов, их индивидуальность зависят от сочетания природных условий, в которых они развиваются и в значительной степени от антропогенного воздействия на русла рек, берега и ложа водохранилищ.

Известно, что задержка водохранилищем твердого стока и перераспределение во времени стока воды приводит к изменению русловых процессов в нижнем бьефе гидроузла. Создание водохранилища приводит к тому, что большая часть наносов (в крупных водохранилищах на равнинных реках практически все наносы) осаждается в нем, и в нижний бьеф вода поступает осветленной. В результате происходит постепенное занесение чаши водохранилища донными наносами и его заиление взвешенными наносами. В этих условиях в нижнем бьефе поток, транспортирующая способность которого оказывается недостаточной, начинает насыщаться за счет размыва примыкающего к гидроузлу участка нижнего бьефа. Этот участок превращается в зону питания наносами расположенной ниже части реки. В русле начинают развиваться необратимые деформации, в которых преобладает общий размыв. В условиях общего размыва происходит снижение («посадка») уровней воды в нижнем бьефе [Ларченко, 2010; Морозова, Двинских и др., 2011].

Особо остро эта проблема возникает при наличии и разработке месторождений песчано-гравийной смеси (ПГС) в нижнем бьефе водохранилища.

Начиная с 1992 г. сотрудниками Лаборатории комплексных исследований водохранилищ ЕНИ ПГНИУ, проводилась оценка влияния разработок ПГС на русловой режим. Объектами исследований являлись месторождения, расположенные в нижнем бьефе Воткинской ГЭС – Банный и Соколинский перекаты, Ольховское месторождение; месторождения, расположенные в зоне постоянного подпора Воткинского водохранилища – Сукманское и Хмелевское; месторождение, расположенное в зоне переменного подпора нижнего бьефа Камской ГЭС – Гайвинское. Нами. Начиная с 2016 г. ведутся постоянные наблюдения на Сивинском и Гольяновском месторождениях и эпизодические – на участке Верхнекамского, Среднекамского, Верхне-Дулесовского и Симонихинского участков недр (р. Кама выше г. Сарапула). Все эти месторождения находятся в нижнем бьефе Воткинского водохранилища и потому в сложных гидрологических условиях. Актуальность таких работ обусловлена требованием, предъявляемым Администрацией Камского бассейна внутренних водных путей и судодводства к организациям, претендующим на добычу ПГМ в русле р. Камы, о необходимости проведения мониторинга русловых процессов на участках русловых месторождений.

В настоящей работе в качестве примера рассмотрим Среднекамский и Верхне-Дулесовский участки недр, исследования которых проводились нами в 2021 г.

В 2012 г. (до начала освоения Верхне-Дулесовского участка недр) сотрудниками Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова проведен предварительный цикл натурных исследований гидрологического и руслового режима р. Камы на участке Воткинская ГЭС – г. Сарапул. В результате исследования были определены оптимальные для сохранности природной среды параметры разработки месторождений – допустимые объемы добычи ПГМ, расположение блоков добычи в пределах месторождения, порядок их отработки; дан прогноз последствий русловой добычи ПГМ для состояния руслового комплекса Камы [Беркович, Ившин и др., 2012; Оценка ..., 2012]. Работы по оценке Среднекамского участка недр были выполнены чуть позднее (2016 г.) ООО «Удмуртгеолцентр».

Изучаемые месторождения песчано-гравийных материалов расположены в нижнем бьефе Воткинского гидроузла на участке 1879,8-1868 км по судовому ходу (Атлас ЕГСЕСЧ РФ, 2016 г.). Схема расположения месторождений приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема расположения объекта исследований

В административном отношении участки месторождения ПГМ расположены в Сарапульском районе Удмуртской Республики и включают 3 месторождения: Верхнекамский, Среднекамский и Верхне-Дулесовский. Объектами исследования в настоящей работе являются два из них: Среднекамский и Верхне-Дулесовский.

Среднекамский участок находится в русле р. Камы на 1875,7-1879,8 км судового хода, протягиваясь вдоль русла на 4,1 км. Верхне-Дулесовский участок недр находится между отметками 1875-1868 км, протягиваясь вдоль правобережья на 6,3 км.

Участок нижнего бьефа Воткинского гидроузла, в пределах которого располагаются рассматриваемые месторождения, характеризуется практически полностью зарегулированными стоком и неустановившемся гидрологическим режимом, обусловленным суточным и недельным регулированием стока Воткинской ГЭС. Поэтому гидрологический режим рассматриваемого участка отличается особой сложностью. Расходы воды за рассматриваемый период (сентябрь 2021 г.) изменялись в пределах 759-1030 м³/с. При таком стоке для р. Камы характерны достаточно низкие скорости течения. На стрежне они на всей длине участка не превышают 0,95 м/с. На прирусловых отмелях формируются хорошо выраженные зоны замедления течения со скоростями 0,2-0,5 м/с. Поток Камы в период обследования характеризовался достаточно низкой мутностью – 2,28 г/м³. Средняя величина прироста уровня воды за 2 года (2019-2021 гг.) составила +0,64 м (или +32 см в год). Полученная величина прироста уровня незначительна и соответствует изменению расхода воды на 160 м³/с (это менее 11% от ве-

личины меженных расходов). Посадки уровней, вероятно, следует считать результатом естественных деформаций русла. Макроформы – перекаты плавно смещаются вниз по течению. Следовательно, продолжительность периода посадок уровня будет пропорциональна времени полного смещения макроформ, а сам процесс посадки обратим.

Морфология русла на участке месторождений Среднекамское и Верхне-Дулесовское определяется расположенными здесь Нечкинскими перекатами. На исследованном отрезке реки расположено 4 переката, разделенных относительно мелководными и короткими плесовыми лощинами. Данные перекаты образуют морфологически единый перекатный участок протяженностью около 14 км. Изучаемый участок включает целиком Пещерский остров и прирусловую отмель вдоль его берега в основном (судоходном) рукаве разветвления.

Русловые отложения Камы представлены песками различной зернистости (от пылеватого до гравелистого), гравием и галькой. По характеру распределения донных отложений на участке можно разделить на две части. Верхний участок приурочен к Верхнекамскому месторождению ПГМ и включает Макаровский перекат. Здесь русло выстлано в основном гравием с одиночными «пятнами» мелкой гальки. Доля частиц в общем составе проб грунта с размеров более 2 мм составила 2-57%. Средний размер частиц – 6,3 мм. Нижний участок приурочен к Верхне-Дулесовскому месторождению ПГМ. Здесь русло выстлано в основном песками (среднекрупно- и крупнозернистыми) с одиночными «пятнами» гальки и гравия. Пески тянутся вдоль левого берега, образуя обширную отмель у левого берега на 1876-1875 км. Пески, включая гравелистый, в общей сложности покрывают большую часть площади участка русла в районе Верхне-Дулесовского месторождения. В их составе преобладают пески крупные и средней крупности. Наименьшее распространение получили пески мелких фракций, гравийные и галечниковые грунты. Средневзвешенный диаметр песчаного аллювия – 1,31 мм.

Руслообразующие наносы (РОН) представлены песками различной зернистости; для участка исследований наблюдается постепенное увеличение вниз по течению доли песчаного материала в составе донных отложений. Сток взвешенных РОН за средний по водности год на участке изучаемых месторождений составил 80 000 т/год. Сток влекомых РОН, рассчитанный по параметрам и скоростям смещения донных гряд для условий непрерывного поступления наносов, составил 512 тыс. т/год. Таким образом, расчетный общий сток РОН (во влекомой и взвешенной форме) на исследованном участке составляет около 592 тыс. т/год или 355 тыс. м³/год.

Материалы натурного обследования 2021 г. показывают, что на рассматриваемом отрезке реки вертикальные русловые деформации сохранили тенденцию предыдущего периода (2012 г.) – понижение отметок дна. Анализ русловых съемок за 2015 и 2021 гг. показал, что по всей длине исследуемых участков наблюдается однонаправленный процесс – размыв русла со значениями от 0,5 до 7,6 м. Участки аккумуляции встречаются одиночными ареалами, причем значение деформаций здесь невелики и составляют $\approx 0,5-1,5$ м.

В пределах Среднекамского месторождения площадь, занятая размывом почти в 40 раз больше, чем площадь аккумуляции. Объем размыва, а также мощность слоя значительно превышают те же показатели аккумуляции. Особенность Среднекамского месторождения заключается в том, что в его пределах судовой ход проходит практически по центру блоков месторождения. При их разработке возможен переход стрежня потока в образовавшиеся искусственные ложбины. Считаем, что разработка блоков Среднекамского месторождения возможна только вне пределов судового хода и исключительно при условии восстановления или сооружения выправительных сооружений.

В пределах Верхне-Дулесовского месторождения параметры русловых деформаций также соответствуют общей тенденции русловых процессов – преобладание размыва. Площадь, занятая размывом также значительно больше, чем площадь аккумуляции.

Сопоставление данных по русловым деформациям (преобладание размыва) и расчетных данных по стоку руслообразующих наносов показали их несоответствие. На исследованном участке наблюдается положительный баланс РОН, т.е. в состав русловых наносов поступает больше материала, чем аккумулируется в виде неподвижных русловых отложений. На космоснимках исследуемых участков, выполненных в период низкой воды 2015 и 2021 гг., видно, что выше оголовка о. Пещерского, напротив струенаправляющей полузапруды у противоположного берега, формируется значительная по протяженности аккумулятивная форма, шириной около 200 м. На снимках 2021 г. отчетливо видно, что и в устье острова также сформировалась обширная аккумулятивная форма. После сооружения струенаправляющей дамбы в правом, второстепенном рукаве о. Пещерского наблюдается аккумуляция.

Считаем, что для точного прогноза русловых деформаций и оценки влияния разработки месторождений на русловой режим необходимо осуществлять ежегодный русловой мониторинг на конкретных участках (блоках) для своевременного выявления опасных процессов, а также для создания базы натурных данных по исследуемому участку реки.

Отсутствие мониторинга, особенно на водохранилищах, делает невозможным достоверный прогноз техногенного воздействия на окружающую среду и исключает своевременное предотвращение аварийных ситуаций на водных объектах. При прогнозе необходим учет индивидуальных особенностей каждого водного объекта (перечень которых еще никем не определен), а это возможно только при проведении регулярного мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

Беркович К.М., Ившин С.Ю., Турыкин Л.А., Злотина Л.В. Учет современной динамики русла реки Камы ниже Воткинского гидроузла при планировании добычи песчано-гравийных материалов // Двадцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Доклады и краткие сообщения. Ижевск, 2012. С. 71–73.

Ларченко О.В. Применение гидроморфологического подхода к расчету русловых деформаций в нижнем бьефе Камского гидроузла // Географический вестник. 2010. №2 (13). С. 76–81.

Морозова Г.В., Двинских С.А., Девяткова Т.П., Ларченко О.В. Подход к изучению изменения гидрологического режима и состояния экосистем водохранилищ в результате разработки месторождений песчано-гравийной смеси // Географический вестник. 2011. №4 (19). С. 33–39.

Оценка воздействия гидромеханизированной разработки руслового месторождения ПГМ «Верхне-Дулесовское» на гидрологический и русловый режим р. Камы. Отчет географического факультета МГУ. М. 2012.

Д.И. Исаев, Д.А. Орлов, С.И. Ванченко

Российский государственный гидрометеорологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДОННЫХ ГРЯД С ПРЕПЯТСТВИЕМ

Грядовый режим перемещения речных наносов является формой транспорта наносов. Эта форма движения наносов характерна наличием структурных особенностей в морфологическом строении гряды, движение которой происходит вследствие размыва напорного склона и перетолжения наносов в подвалье гряды. Процесс перемещения гряды в стационарных условиях достаточно статичен и хорошо изучен в лабораторных условиях. Вместе с тем в литературе практически не описано, как взаимодействует движущаяся гряда с возникшим на ее пути препятствием. Особенно актуальным становится изучение этого взаимодействия в случае, если препятствием является какое-либо гидротехническое сооружение.

В РГГМУ был выполнен цикл исследований процессов прохождения донных гряд через различного рода препятствия. Лабораторные исследования проводились в гидрометрическом лотке прямоугольного сечения длиной 6 м.

Гряды (рифели) формировались водным потоком глубиной 4-6 см на песчаной подушке среднезернистого песка. Высота гряд при этом составляла 0,8-1,0 см. Известно, что крайне сложно получить гряды с заранее заданными параметрами. Поэтому при проведении экспериментов геометрические размеры препятствий определялись параметрами образованных в лотке гряд.

Препятствия изготавливались из пластичного материала и имели разнообразную в плане форму – от прямоугольной до остроугольной и округлой. Передняя кромка препятствий в первой серии экспериментов была прямоугольной. Высота препятствий равнялась высоте гряд. Эксперименты показали, что во всех случаях перед фронтальной кромкой препятствий стабильно возникает зона размыва. Сразу за препятствием наблюдается аккумуляция наносов. При этом для кольцеобразных, замкнутых препятствий эта зона аккумуляции располагалась внутри препятствия. За зоной аккумуляции располагается достаточно обширная (до 3-4 продольных размеров препятствия) зона размыва,

сменяемая конусом выноса материала, форма которого определяется плановыми очертаниями препятствия.

Во второй серии экспериментов прямоугольная лобовая грань препятствий была заменена на скошенную по потоку под 45 градусов. В этом случае воронка размыва перед фронтальной гранью препятствия практически не образовывалась. За тыловой (прямоугольной) гранью препятствий схема деформаций осталась прежней.

Следующая серия экспериментов была направлена на изучение процесса преодоления препятствия одиночной грядой. При этом процесс изучался на треугольном в плане препятствии, направленном вершиной навстречу потоку. В эксперименте менялась высота препятствия относительно высоты гряды. Было замечено, что при высоте препятствия менее высоты гряды последняя преодолевает препятствие, как бы не замечая его – не изменяется ни фронт гряды, ни ее высота. Если высота препятствия равна или больше высоты гряды, характер прохождения гряды через препятствие существенно изменяется. На фронте препятствия возникает воронка размыва. Линия гребня гряды ломается, левые и правые крылья гряды, огибающие препятствие, существенно ускоряют свое движение, огибая препятствие. За препятствием линия гребня гряды снова выравнивается.

Полученные результаты лабораторных экспериментов могут служить основой для выработки рекомендаций по проектированию и размещению сооружений и приборов на дне реки с грядовым режимом движения наносов.

Р.С. Чалов, А.С. Завадский, А.А. Куракова, А.М. Камышев
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

МОРФОЛОГИЯ РУСЛА СРЕДНЕГО И НИЖНЕГО ИРТЫША (РОССИЙСКИЙ УЧАСТОК)*

Исследования русловых процессов на р. Иртыше в среднем и нижнем течении до последнего времени сводились к описанию отдельных форм их проявления, и сведения о них носили выборочный или локальный характер. По сравнению с р. Обью, притоком которой является Иртыш и на которой русловые процессы, особенно в среднем и верхнем течении, начиная с середины XX века, постоянно изучаются, Иртыш можно назвать "белым пятном" в географическом русловедении. Первое полноценное исследование морфодинамики и гидроморфологии русла Иртыша было проведено авторами [Куракова, 2022; Куракова, Чалов, 2022], но оно касалось только участка от устья р. Тобола до слияния с р. Обью.

В 2021-2023 гг. благодаря технической поддержке Администрации «Обь-Иртышводпути» (руководитель Р.А. Чесноков) на всем протяжении российской части реки (от границы с Казахстаном до устья) были выполнены натурные исследования р. Иртыша, позволившие впервые дать полную характеристику морфодинамики и условий формирования меандрирующего и разветвленного русла р. Иртыша, оценку изменений типов и параметров форм русла в процессе русловых деформаций. Для этого был выполнен ретроспективный русловой анализ на основе сопоставления разновременных карт реки и космических снимках, начиная с 70-х годов XX века, планов перекатов и перекатных участков за последние 5 лет и других материалов, фиксирующих состояние русла на определенные временные срезы. При проведении натурных исследований измерялись расходы воды в разветвлениях русла, скоростные поля на отдельных излучинах и в узлах разветвлений, мутность воды (с последующим определением расходов взвешенных наносов), производился отбор проб донных отложений.

© Чалов Р.С., Завадский А.С., Куракова А.А., Камышев А.М., 2023

*Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши (№ 121051400038-1) и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов (№121051100166-4) при финансовой поддержке РНФ (проекты 18-17-00086 – натурные исследования 2021 и 2022 гг. и 23-17-00065 – натурные исследования 2023 г. и русловой анализ меандрирующего и разветвленного русла).

Общая характеристика реки и условия формирования русла

Река Иртыш имеет протяженность 2045 км в пределах России, охватывая частично среднее и все нижнее течение, пересекает юго-западную часть Западно-Сибирской равнины, характеризуясь свободными условиями развития русловых деформаций. От границы с Казахстаном до устья р. Тары течет по Барабинской низменности; ниже и до г. Тобольска (слияния с р. Тоболом) правый борт долины представлен уступами Иртышской возвышенности – отрогами плоского Васюганского плато [Западная Сибирь 1963; Воскресенский, 1968], а сама река протекает по границе плато с Ишимо-Иртышской равниной. Старосолдатский вал, который протянулся с северо-запада на юго-восток по равнине, образует суженные участки долины, обусловившие формирование адаптированного русла в районе г. Омска и два коротких участка врезанного русла уже ближе к устью р. Тобола.

Иртыш течет на север от государственной границы до г. Омска, затем на северо-восток, у устья р. Тары поворачивает на северо-запад и от устья р. Тобола – на север. Ширина днища долины реки изменяется от 4-8 до 18-22 км и периодически сужается или расширяется по длине реки. Ширина русла колеблется от 0,5 до 1,0 км, уклон реки – от 0,05 до 0,025‰. В районе г. Тобольска ниже слияния с р. Тоболом река приближается к правому коренному берегу и, огибая Тобольский «материк», поворачивает на север, меняя направление на субмеридиональное. Ширина днища долины в нижнем течении реки изменяется от 5-10 до 15-20 км, ширина русла зависит от его формы и колеблется от 0,5 до 1,5 км. Русло Иртыша проходит вдоль правого борта долины вплоть до г. Ханты-Мансийска, по левобережью простирается песчаная равнина в 30-50 км от реки с абсолютными отметками 40-45 м. Уклон реки в нижнем течении составляет 0,025-0,020‰.

Огибая у г. Ханты-Мансийска северную оконечность Тобольского материка – Самаровский останец и образуя возле него обтекающую излучину, Иртыш на нижних 20 км пересекает долину и пойму Оби, принимая рукава ее раздвоенного русла (протоки Бол. Неулевка и Тренькина) [Чалов, Камышев и др., 2021].

Основной источник питания р. Иртыша – талые и грунтовые вод. Водный режим относится к западносибирскому типу (по Б.Д. Зайкову). Половина годового стока реки проходит весной, 27% летом, 19% осенью и 7% зимой. Среднегодовой расход воды у г. Омска составляет 851 м³/с, в г. Тобольске – 2150 м³/с. Среднегодовой максимальный расход воды соответственно 4870 и 6500 м³/с. В устье реки среднегодовой расход воды составляет 2830 м³/с, максимальный – 7950 м³/с.

Рост годового стока происходит из-за влияния притоков – рек Тары, Демьянки, Ишима, Тобола, Конды и других малых рек. В нижнем течении (ниже г. Ханты-Мансийска) на последних 10 км водность реки возрастает в результате слияния с рукавами раздвоенного русла средней Оби – Бол. Неулевки (904 м³/с) и Тренькина (382 м³/с). Водность реки возрастает в 3,3 раза, в половодье – в 3,7 раза. Средняя годовая величина колебаний уровня воды в реке составляет от 3 до 8 м, наибольшая величина наблюдается на приустьевом участке.

Мутность воды Иртыша возрастает вниз по течению: у г. Омска – 138 г/м³, у г. Тобольска – 163 г/м³; расход взвешенных наносов у г. Омска равен 54 кг/с, в г. Тобольске – 310 кг/с, у г. Ханты-Мансийска – 870 кг/с.

Ледовые явления на нижнем Иртыше начинаются в начале ноября и быстро распространяются вниз по течению. Осенний ледоход длится около двух недель, с образованием заторов, максимальная толщина льда – 1 м. Весенний ледоход непродолжительный, длится 5-7 дней. Вскрытие реки происходит с юга на север, сопровождаясь заторами. Полное очищение реки ото льда происходит в конце апреля – начале мая.

Морфодинамические типы русла, рассредоточение стока в разветвлениях и русловой режим

Средний и нижний участки Иртыша от границы с Казахстаном до устья разделяется на четыре макроучастка по распространению морфодинамических типов русла, геолого-геоморфологическим условиям их формирования и водности реки (рис. 1). Верхний макроучасток А – самый короткий, но имеет продолжение вверх по течению в Казахстане. Его длина в России – 65 км (до н.п. Черлак), русло широкопойменное.

Макроучасток Б простирается до Карташевской горы, его длина 420 км. Река в его пределах в основном течет вдоль правого коренного берега. Русло в основном адаптированное, представлено односторонними и одиночными разветвлениями, либо прямолинейное, иногда образует излучины. Макроучасток В – самый большой по длине (1615 км), заканчивается слиянием Иртыша с р. Тоболом, характеризуется абсолютным преобладанием широкопойменного меандрирующего русла.

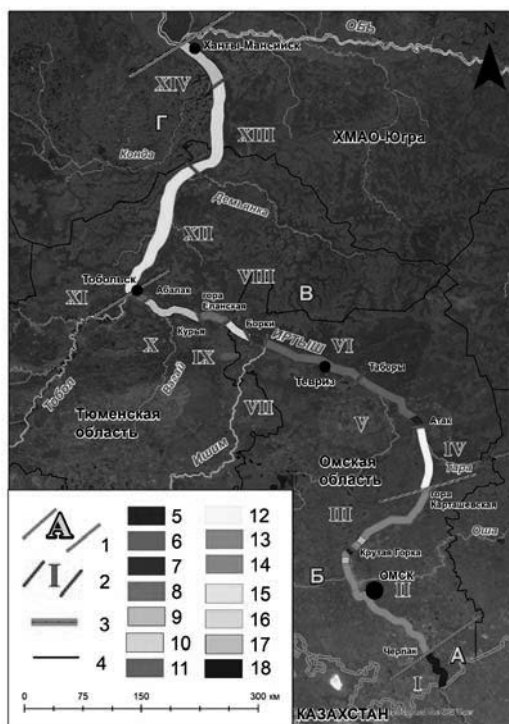


Рис. 1. Схема расположения морфологически однородных участков русла Иртыша в пределах России. 1 – границы и индексы макроучастков, 2 – границы и номера морфологически однородных участков, 3 – государственная граница, 4 – границы субъектов РФ; типы русла: 5 – прямое русло, 6 – чередование излучин и прямолинейного русла, 7 – врезанные излучины, 8 – вынужденные, вписанные и сундучные излучины, 9 – свободные и вынужденные излучины, 10 – свободные, вынужденные и вписанные излучины, 11 – свободные, вынужденные, вписанные и сундучные излучины, 12 – большие излучины, 13 – чередование односторонних разветвлений и прямолинейного русла, 14 – односторонние разветвления, 15 – большие, вписанные, вынужденные, сундучные и свободные излучины; 16 – чередование вписанных, вынужденных и свободных излучин с одиночными разветвлениями; 17 – свободные излучины, 18 – чередование прямолинейного русла, русловых разветвлений и свободных излучин

Макроучасток Г – самый многоводный, начинается от устья р. Тобола, который увеличивает водность реки в 1,65 раза. Слияние с р. Кондой увеличивает водность еще на 30%. Русло в основном сво-

бодно меандрирует, широкопойменное, ширина поймы возрастает от 10 до 20 км.

Первый морфологически однородный участок реки полностью совпадает с макроучастком А, характеризуется односторонними прибрежными разветвлениями и единичными разветвлениями с квазиравномерным распределением стока между рукавами. Русло здесь прямолинейное или разветвленное, проходящее вдоль правого коренного берега, образует серию из трех крутых свободных излучин, а также сохранившиеся реликты ранее спрямленных излучин. Это может свидетельствовать о прошлых изменениях русла реки, которые могли произойти как из-за естественных переформирований, так и техногенного вмешательства. Встречаются удлинённые острова, имеющие большое соотношение длины и ширины (L_o/B_o) и образующие либо параллельно-рукавое русло, либо односторонних прибрежных разветвлениях. В рукавах встречаются разветвления второго порядка, образованные малыми или элементарными островами.

Макроучасток Б располагается вдоль правого борта долины реки и имеет преимущественно разветвленное русло, но некоторые участки прямолинейные неразветвленные, особенно в нижней его части. Перед г. Омском есть протяженный участок параллельно-рукавных разветвлений. Количество прямолинейных неразветвленных участков увеличивается вниз по течению реки. Для участка Б-I характерна массовая разработка карьеров ПГС, определяющая развитие тех или иных рукавов и русловой режим реки в целом.

На участке Б-II между г. Омском и Крутой Горкой испытывают значительное градопромышленное давление из-за того, что участок находится в пределах городской черты Омска и его окрестностей. Многие дамбы перекрывают второстепенные рукава, которые используются как затоны для портовых и судоходных предприятий, предприятий водного пути и различных промышленных и коммунальных объектов. Строительство дамб, нескольких мостовых переходов, берегозащитных сооружений создало условия для стабилизации русла на данном участке.

Пойма здесь относительно узкая, шириной от 4 до 6,4 км, русло имеет ширину от 300 м до 1100 м с островами, образующими чередующиеся и односторонние разветвлениями, разделенные прямолинейными вставками или пологими излучинами. Река на этом участке и далее в основном течет вдоль правого берега, и в естественных условиях поперечный уклон формировался в сторону левобережной пой-

мы, что привело к преимущественному образованию островов вдоль левого пойменного берега.

Ниже по течению (участок Б-III, н.п. Крутая Горная – гора Карташевская) прямолинейное неразветвленное русло (46,3%) прерывается односторонними лево- и правобережными одиночными и участком сопряженных разветвлений (суммарно 5,5%), образованными вытянутыми островами ($L_o/B_o=11,1$ и $7,9$). Односторонние разветвления образованы двумя островами, разделенными маловодными межостровными протоками, либо, в свою очередь, характеризуются разветвлениями 2-го порядка на заходе в основные (судоходные) рукава, в которых поток на заходе в основной судоходный рукав разделяется на две короткие протоки, водность которых составляет, соответственно, 4,5 и 39,4%. Во многих рукавах острова возникли в конце XX-начале XXI века при зарастании осередков. Некоторые разветвления перестали существовать, в том числе благодаря перекрытию маловодных рукавов дамбами.

Макроучасток В – от горы Картышевской до устья р.Тобола может быть разделен на 8 морфологически однородных участков, различающихся по преобладанию различных типов излучин, изменению ширины днища долины, уровнем водоносности и взаимодействием реки с коренными берегами. Иртыш здесь в основном меандрирует, однако, на некоторых участках образуются острова на прямолинейных «вставках» между большими излучинами и на верхних крыльях крутых излучин. Типичные разветвления с относительно прямолинейными рукавами встречаются очень редко, определяясь местными условиями, шириной поймы и влиянием неровностей коренных берегов. На участке от устья р. Ишима до п. Борки, где русло врезанное, разветвления отсутствуют. Разветвления 2-го порядка и прорванные излучины появляются только ниже устья р. Ишима, особенно после ее слияния с рекой Тобол, где расходы воды формируют русло при затопленной пойме. На этих участках также начинают появляться пойменные протоки.

От горы Карташевской до населенного пункта Атак участок В-IV протяженностью 1576 км характеризуется резким расширением поймы до 22,4 км и абсолютным преобладанием извилистого русла. На этом участке можно выделить 16 свободных излучин (41,2% от длины), 5 вынужденных излучин (13,5%) и 4 сундучных излучины (20,8%). Наименьшая ширина долины в пределах участка составляет 14,6 км, но возникает сужение днища долины до 2 км у населенного пункта Евга-

щино. Далее ширина поймы снова увеличивается до 15,5 км, но к концу участка сокращается до 9 км.

Более чем треть свободных излучин относится к категории больших излучин, у которых стрела прогиба составляет от 2140 до 4100 м. Вершины этих излучин касаются противоположных бортов долины, а между ними находятся прямолинейные «вставки», которые сопрягаются с нижними и верхними крыльями смежных форм. На таких «вставках» обычно возникают местные расширения русла, в которых формируются одиночные или односторонние разветвления. Большинство излучин группируются в серии из двух-семи излучин каждая, и только три излучины образуют одиночные формы между короткими участками прямолинейного неразветвленного русла или одиночными разветвлениями.

Участок В-V, расположенный между н.п. Атак и н.п. Таборы характеризуется чередованием с чередованием прямолинейного неразветвленного русла и серий излучин, часто осложненных односторонними и осередковыми разветвлениями. На этом участке находится 25 излучин, которые составляют более половины длины участка. Большинство излучин являются вписанными, вынужденными или сундучными, в то время как свободные излучины составляют 48% от их общего количества. Четыре большие излучины расположены так, что их вершины касаются бортов днища долины. Большинство свободных излучин на этом участке являются пологими.

Ширина поймы на этом участке в среднем составляет 18-19 км, хотя может достигать 22 км или уменьшаться до 7 км. Русло тяготеет к правому коренному берегу, что приводит к формированию сундучных излучин и значительной доли прямолинейного русла (40%).

На участке от н.п. Таборы до устья р. Ишима русло также широкопойменное, но ширина поймы сокращается от 8-12 км до 7 км. Большая часть русла меандрирует (67,1% длины участка), причем ширина пояса меандрирования соответствует ширине днища долины. На этом участке всего 9 из 41 излучин имеют стрелу прогиба более 2000 м, в то время как на предыдущем участке их было 10 из 25. Многие излучины, у которых стрела прогиба меньше 2000 м, также касаются бортов долины, их крылья пересекают пойму по диагонали. На этом участке преобладают вписанные, вынужденные (13 ед., 23,7% длины) и сундучные излучины (5 ед., 13,6%). Среди свободных излучин 8 являются крутыми, остальные пологие и развитые.

Пять излучин имеют разветвления 2-го порядка, которые развиваются на верхних крыльях и в их привершинных частях, где спрямляющие протоки у выпуклых берегов нередко достаточно многоводные (например, в Петровском разветвлении, водность такой протоки составляет 24,9%). 29,7% длины участка составляют прямолинейные русла без разветвлений (12 отрезков русла с общей длиной 56,5 км). В местах расширения русла между смежными излучинами и длинными крыльями обычно имеется одиночное разветвление, где сток периодически перераспределяется между обоими рукавами.

Участок от устья р. Ишима до населенного пункта Борки (B-VII) является самым коротким на среднем Иртыше (37 км). Русло здесь врезанное, выделяется две серии излучин (5 и 2 в каждой серии), которые разделены коротким прямолинейным отрезком (3 км). Участок заканчивается прямолинейным руслом длиной 5,5 км. Пять излучин этого участка относятся к категории пологих, и только вторая излучина (Новоникольская) в первой серии является крутой, имеющей пальцеобразную форму (соотношение прогиба h_n к длине излучины L равно 2,3, стрела прогиба $h_n = 2050$ м). Вторая излучина во второй серии также крутая, но имеет сегментную форму и соотношение l/L также равно 2,3, но $h_n = 1600$ м. Для всего участка характерны повышенные значения всех параметров излучин.

Участок от населенного пункта Борки до горы Еланской (B-VIII) имеет длину 96 км и характеризуется широким руслом, в котором 90,1% всей длины занимают излучины. Короткие прямые участки (их 4) имеют общую длину всего 9,5 км. На этом участке есть пять серий излучин, каждая из которых состоит из 2-7 смежных излучин, протяженность которых варьирует от 2 до 39 км; иногда они имеют сложные петлеобразную форму.

Все петлеобразные излучины на этом участке состоят из комбинации различных типов излучин: сегментных излучин в верхнем или нижнем крыле и в привершинной части или прямолинейного участка, образующего нижнее удлинненное крыло верхней излучины.

Участок B-IX (гора Еланская – населенный пункт Курья) характеризуется узкой поймой, включает в себя 7 врезанных, 3 вписанные и адаптированные и 3 сундучные излучины, которые образуют единую серию.

Русло на участке B-X от н.п. Курья до н.п. Абалак снова расширяется и становится широкопойменным. Большая часть русла (79,5%) продолжает меандрировать – на участке 19 свободных излучин (46,5% от общей длины участка), в том числе 6 вписанных и вынужденных.

Большинство излучин объединено в серии (8 серий). Также имеется несколько коротких прямых участков (их 8 длиной 29,5 км), в общей сложности составляющих 14,4% длины всего участка, и одно разветвление. На 5 излучинах участка в их верхних частях сформировались прибрежные разветвления, вероятно, из-за повышенной водности второстепенных рукавов и прохождения руслоформирующего расхода воды при затопленной пойме.

Участок В-ХІ (н.п. Абалак – устье р. Тобола) представлен чередованием прямолинейного неразветвленного русла, располагающегося вдоль правого коренного берега и серий из двух излучин, из которых одна – свободная, вторая – вынужденная или вписанная.

Таким образом, на макроучастке В (от горы Карташевская до устья реки Тобол) абсолютное большинство составляют участки меандрирующего русла, причем их доля на морфологически однородных участках варьирует от 72 % до 90,1 %, и только на двух участках (В-ХІ) доля прямолинейного неразветвленного русла составляет 46 %. На участке В-V доля прямолинейного и разветвленного русла составляет 40 % и 7,9 % соответственно. Это объясняется влиянием правого коренного берега, его выступов и мысов, ниже которых формируются острова.

После слияния с р. Тоболом (макроучасток Г), который увеличивает сток Иртыша на 1,6 раза, ширина днища долины B_d последовательно увеличивается, а взаимодействие русла реки с ее бортами уменьшается. Эти признаки позволяют разделить Иртыш на три морфологически однородных участка: Г-ХІІ – от устья р. Тобола до устья р. Демьянки (355 км), где B_d колеблется в пределах около 10 км, русло приближается к правому коренному берегу и формируются большие излучины, которые в вершинах касаются противоположных бортов долины; Г-ХІІІ – от устья р. Демьянки до устья р. Конды (206 км), где B_d достигает 12 км, русло проходит вдоль правого коренного берега, а слева остается широкая пойма; Г-ХІV – нижние 106 км реки, где ширина B_d увеличивается до 20 км, русло находится посередине днища долины и свободно меандрирует, и лишь в конце участка у г. Ханты-Мансийска Иртыш приближается к правому коренному берегу. Ниже города Ханты-Мансийска Иртыш пересекает пойму Оби и принимает рукава ее раздвоенного русла – протоки Большая Неулевка и Тренькина.

Преобладающая форма русла на всем макроучастке – извилистая (река меандрирует), которая составляет 65,9% его длины (439,5 км из 666,5 км участка). Прямолинейные отрезки занимают 24% русла и

имеют суммарную протяженность 160 км. Разветвления составляют 10,1% длины реки (67,5 км), причем большинство из них – одиночные (9 из 11, суммарная длина – 60 км), одно является параллельно-рукавным. Более трети всех излучин русла осложнены разветвлениями, которые образуются в привершинных частях излучин или через шпору излучин. Прямолинейные участки иногда имеют односторонние прибрежные разветвления, которые отделены от береговой поймы относительно маловодными (0,6-6,5%) протоками. Общая длина разветвлений (собственно разветвления русла и разветвления, осложняющие излучины и прямолинейные участки) на нижнем Иртыше составляет 145,5 км, или 21,8% его длины.

На нижнем Иртыше наиболее распространены сегментные свободные излучины (32 в общей сложности) – 26,9% протяженности реки ниже устья Тобола и 40,8% извилистого русла. Вторыми по распространенности являются синусоидальные и пальцеобразные излучины (12), протяженность которых составляет 10,7% (71 км). Большинство излучин – с нарушением условий безотрывного обтекания берегов (правило Миловича), что приводит к образованию отмелей возле вогнутого берега в вершине излучин, в то время как к выпуклому берегу смещается фарватер. Это особенно характерно для вынужденных излучин, где изгиб русла в их вершине образует угол 90° и более.

На протяжении участка Г-ХІІІ от устья р. Демьянки до поворота Кировского (всего 206 км) днище долины Иртыша расширяется до 10-12 км, и русло реки в основном располагается вдоль правого берега долины, образуя вынужденные и вписанные излучины. Эти излучины характеризуются меньшими параметрами, чем на предыдущем участке. Здесь также увеличивается количество русловых разветвлений, и практически все излучины и участки с прямолинейным руслом осложнены ими.

На нижнем участке Г-ХІV длиной 106 км днище долины значительно расширяется и достигает ширины 15-20 км. В низовьях долина Иртыша соединяется с долиной р. Оби. На этом участке находится две серии излучин по 6 излучин каждая, которые характеризуются более низкими значениями их параметров, но одновременно имеют более сложную структуру, осложняясь вторичными разветвлениями в их верхних частях. Серии излучин разделены прямолинейным руслом длиной 5,5-6 км. Весь пояс меандрирования в основном находится в центральной части днища долины и может достигать ширины до 5 км. На этом участке также возникают пойменные протоки. Широкая пойма

и наличие пойменных протоков снижают удельный расход воды, который формирует русло во время половодья и сокращает водность основного русла Иртыша при затоплении поймы.

Ниже устья р. Тобола на Иртыше наблюдается снижение параметров форм русла вдоль течения несмотря на то, что водность реки продолжает увеличиваться. Это связано с тем, что днище долины расширяется, что ведет к растеканию потока в половодье по пойме и оттоку его части в пойменные протоки. На всем макроучастке Г (ниже устья р. Тобола) преобладают пологие излучины, доля которых уменьшается вниз по течению. Лишь на первом участке XII формы русла представлены практически всем диапазоном степеней развитости излучин, но ниже по течению исчезают крутые излучины.

Заключение

Иртыш отличается интересной особенностью в распространении морфодинамических типов русла по длине реки. При увеличении ее водного стока в 3,3 раза происходит смена разветвлений русла в субограниченных условиях развития русловых деформаций (адаптированном русле) на свободно меандрирующее ниже по течению. При этом русло Иртыша становится не просто извилистым, но в нем преобладают сложные петлеобразные, пальцеобразные и крутые излучины. Кроме того, для Иртыша, как и для некоторых других больших рек, не характерна зависимость параметров излучин от величины характерного расхода воды, что является типичным для меандрирующих рек.

Второй особенностью меандрирования русла реки Иртыш является развитие излучин на двух структурных уровнях. На первом уровне излучины имеют меньшие параметры по сравнению с днищем долины, а на втором более высоком уровне появляются большие сегментные, петлеобразные и пальцеобразные излучины, у которых ширина пояса меандрирования равна ширине днища долины, а вершины смежных излучин касаются противоположных бортов долины. Петлеобразные излучины представляют собой комбинацию из трех «нормальных» сегментных излучин, из которых верхняя и нижняя являются ее крыльями, а между крыльями смежных часто присутствуют прямолинейные вставки. Для Иртыша критерием перехода от «нормальных» к большим излучинам является величина стрелы прогиба, которая составляет от 2000 до 3000 м, однако ее определение требует проведения специального гидролого-морфометрического анализа.

Отмеченные особенности могут быть причиной отсутствия зависимости параметров излучин от величины характерного расхода воды в реке. Изменения в ширине днища долины, гидравлические условия и наличие коренных берегов также влияют на формирование и эволюцию русла, а, следовательно, на форму и размеры излучин. При меньших удельных расходах воды в русле из-за растекания потока по пойме и пойменным протокам излучины параметры снижаются, при повышении возрастают. При этом крутые излучины (местное название – повороты) могут быть вынужденными, обусловленными наличием коренных берегов и связанной с ними спецификой гидравлических условий в русле.

Формирование разветвлений и островов в русле реки вносит определенные коррективы в ее деформации и приводит к рассредоточению стока. Острова могут создавать дополнительные условия для образования местных гидравлических условий и приводить к изменению морфометрических характеристик русла. Кроме того, острова изменяют расход воды в разных частях и формах русла, определяя режима течений. Формирование островов и разветвлений в русле реки является естественным процессом, который происходит под влиянием многих факторов, включая гидродинамические, морфологические и геологические.

Перестройка меандрирующего русла нижнего Иртыша происходит, главным образом, за счет продольного перемещения излучин, что сопровождается размывом вогнутых берегов в их нижних крыльях. Одновременно происходит поперечное перемещение вследствие размыва берегов в привершинных частях излучин. Самые значительные изменения связаны с петлеобразными излучинами, вызванными размывом берегов на их крыльях, где формируются нормальные сегментные излучины.

Одной из особенностей меандрирующего русла Иртыша является образование вынужденных и сундучных излучин. Последние состоят из комбинации вынужденной излучины на подходе к коренному берегу, прямолинейного отрезка русла вдоль него и адаптированной излучины, где русло отклоняется в сторону поймы. Вынужденные излучины, как одиночные, так и составляющие часть сундучных, обычно имеют большую крутизну, а в их привершинной части или в верхних крыльях могут появляться разветвления, которые усложняют их морфологию.

ЛИТЕРАТУРА

Воскресенский С.С. Геоморфология СССР. М.: Высшая школа. 1968. 368 с.

Западная Сибирь. М.: Изд-во АН СССР. 1963. 488 с.

Куракова А.А. Размывы пойменных берегов Оби и Иртыша и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2022. № 1 (60). С. 40-59.

Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфодинамика русла нижнего Иртыша // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 99-109.

Чалов Р.С., Камышев А.А., Завадский А.С., Куракова А.А. Морфодинамика и гидролого-морфологическая характеристика русла средней Оби на широтном участке // География и природные ресурсы. 2021. № 2. С. 92-102.

Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни русловых процессов и морфодинамические типы русел // Тридцать седьмое пленар. межвуз. координац. совещ. по пробл. эрозионных, русловых и устьевых процессов. Рязань. 2022. С. 170-173.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Д.Н. Айбулатов, И.А. Жуков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

АНАЛИЗ ВОДНОГО РЕЖИМА МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНА ВОЛГИ

С 70-х гг. XX в. Европейская территория России характеризуется значительным изменением климатических характеристик, которые влияют на водность рек, преобладающие типы их питания, распределение стока внутри года, а также обуславливают формирование опасных гидрологических явлений.

Актуальность данной работы связана со слабой изученностью водного режима и внутригодового распределения стока малых рек – самых распространённых водотоков на территории России. Это приводит к увеличению числа опасных гидрологических явлений, которые приводят к большим потерям в экономическом секторе.

Цель данной работы заключается в оценке вклада различных генетических компонентов стока в формирование водного режима малых рек в бассейне Верхней и Средней Волги, выявлении пространственных и временных закономерностей изменений основных гидрологических характеристик.

В ходе исследований получены непрерывные ряды разной продолжительности для 178 метеорологических станций и собраны данные о расходах на 210 гидрологических постах малых рек, расположенных на исследуемой территории. Для 57 гидрологических постов собраны непрерывные ряды наблюдений за ежедневными расходами воды максимальной длины.

Анализ гидрологических процессов на малых реках начинается с гидрологической изученности бассейна, для её систематизации необходима классификация рек по площади бассейна. В результате изучения действующей нормативной базы, применяемой при проведении гидрологических изысканий, предложена новая классификация малых рек по площади бассейна. С градацией: 50 км² – граница ручья и рек. 100 км² – граница использования формулы предельной интенсивности. 200 км² – граница применения редукционной формулы. 1000 км² – граница использования карт изолиний для определения коэффициента вариации. 2000 км² – граница малых и средних рек.

В результате исследований установлено, что на изучаемой территории значительно повысился годовой сток по сравнению с нормой

предшествующих многолетних наблюдений. Общее увеличение речного стока района составило 4,8%.

Для рек характерен тренд к уменьшению максимальных расходов весеннего половодья или его отсутствие. Максимальные расходы воды уменьшились более чем в 2 раза. Превышение весенних максимальных расходов воды над средними меженными сокращается с 10-15 до 3-5 раз.

Для региона летний меженный сток увеличился на 50-100%. Также увеличивается объём стока в зимнюю межень до 130%.

Наиболее существенное увеличение минимального стока (более 50-70%) происходит в верхнем течении Оки и Волги. В нижнем течении исследуемой территории минимальный сток увеличивается на чуть меньшие значения 20-40%.

Кроме этого, установлено, что в большинстве исследуемых речных бассейнах наблюдается увеличение продолжительности и интенсивности паводков. Максимальный расход летних паводков увеличился до 80%. Объём паводочного стока за год увеличился на 40-50%. Увеличение зимних паводков выросло на 25-30%.

Следует отметить, что, несмотря на аazonальность и атипичность межгодового и внутригодового распределения стока воды малых рек, для них возможно составление карт параметров стока воды, а также подтверждена схожесть динамик и закономерностей гидрологических изменений стока воды и его генетических составляющих у малых и больших рек, а также схожесть распределения их модулей стока.

С.Г. Барышников¹, Г.Я. Барышников²

¹*Институт водных и экологических проблем СО РАН,*

²*Алтайский государственный университет*

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ НА БЕССТОЧНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ В БАССЕЙНЕ р. ИРТЫША

Бессточной территорией считается участок земной поверхности, на котором отсутствует механизм стока поверхностных или подземных вод (Чеботарёв, 1978). Как известно, большая часть поверхности суши земли имеет общий уклон в сторону существующих морей и океанов, а меньшая (около 22%), является областью внутреннего стока и имеет уклон внутрь материков, либо в замкнутые котловины.

Как правило, бессточные области характерны для районов со слабопересечённым рельефом и с засушливым климатом. К таким районам принадлежат территории юга Западной Сибири, Северного и Центрального Казахстана, входящими в бассейн р. Иртыш. Бессточность юга Западной Сибири объясняется не только засушливостью климата, но и континентальностью её территории. Этот, специфичный на первый взгляд, вывод имеет своё научное объяснение. Наличие озёрно-западинной сети на юге равнины связываются, в основном, с процессами оттаивания мерзлотных таликов и с суффозией [Ткачёв, 2001].

Как было отмечено выше, рельеф юга Западной Сибири характеризуется развитием аэральных процессов с суффозионными просадками грунтов, что создаёт мозаику мезоформ рельефа. Плоские наклонные равнины – Ишимская и Прииртышская – имеют ярко выраженный гривноложбинный рельеф. Ложбины заняты цепочками озёр и небольшими местными речками. Как правило, эти реки в основном бессточные, а транзитные реки – Иртыш, Ишим и Тобол, почти не принимают притоков.

На бессточных территориях Казахстана в бассейне р. Иртыш А.А. Макунина [1985] выделила три физико-географические области: Тургайскую, расположенную в западной части страны до долины Ишима и две в пределах Казахского мелкосопочника – Тенгиз-Ишимскую и Балхаш-Иртышскую. На территории Тургайской области отмечается много блюдцеобразных озёр и слабо развитой речной сети.

Западная часть Казахского мелкосопочника, представленная Тенгиз-Ишимской областью, обладает более сниженным рельефом, чем восточная. Здесь расположена наиболее развитая речная сеть системы р. Ишим. Однако и она не обеспечивает достаточное дренирование поверхности.

Балхаш-Иртышская область охватывает большую восточную часть Казахского мелкосопочника; она расположена на водоразделе оз. Балхаш и р. Иртыш, но с этой территории ни в Балхаш, ни в Иртыш поверхностного стока почти нет. Эта часть Казахского мелкосопочника выделяется возвышенным рельефом мелкосопочных массивов. Для области характерны временные водотоки. Остальные реки и речки, стекающие к Балхашу и Иртышу, их не достигают.

Таким образом, юг Западной Сибири, Северная и часть Центрального Казахстана в бассейне р. Иртыш относятся к бессточным территориям. Тем не менее, эти территории максимально используются во многих отраслях народного хозяйства России и Казахстана. Среди причин загрязнения водоёмов юга Западной Сибири особо выделяется

распашка водосборов, способствующая аккумуляции в озерных котловинах частиц почвы, растворенных веществ, снесённых ветром и текущей водой, биогенных элементов, остатков гербицидов [Аллахвердиева, 2022].

В качестве мер по улучшению экологического состояния р. Иртыш и Прииртышской бессточной территории на юге Западной Сибири, предлагается увеличить количество лесных насаждений, произвести лесовосстановительные работы и уменьшить процент распаханых территорий, с переводом используемых земель под пары [Барышников С.Г., Барышников Г.Я., 2022].

В связи с ростом дефицита качественных природных вод особую значимость приобретают проблемы охраны и восстановления ресурсного потенциала озёрного фонда на бессточных территориях. К настоящему времени уровень использования озёрных систем не отвечает потенциальным возможностям водоёмов. Основная причина этого кроется в недооценке значимости озёр, сложившийся экстенсивный характер их использования и высокая степень деградации под воздействием хозяйственной деятельности человека.

Другим направлением использования озёрных систем на бессточных территориях Северного Казахстана является применение озёрных сапропелей в качестве сбалансированных удобрений и кормов для домашних животных.

Как известно, сапропель является ценным органоминеральным удобрением. В его состав входят почти все необходимые для питания растений вещества. Он также улучшает структуру почв. Широкое применение находит сапропель в животноводстве и ветеринарии. В сапропеле содержатся необходимые для нормального роста и развития животных такие жизненно необходимые элементы как кальций, фосфор, железо, микроэлементы – кобальт, марганец, медь, бор, молибден, цинк, йод, а также витамины С и D [Назарова и др., 2019; Фомин и др., 2020].

Таким образом, нарушения природной среды при различных антропогенных и стихийных воздействиях на бессточные территории юга Западной Сибири и Северного Казахстана в бассейне р. Иртыш, очевидно, неизбежны, однако они должны быть сведены до минимума и быть экологически и экономически оправданными. Любые хозяйственные или иные решения должны приниматься с таким расчётом, чтобы не превысить пределы вредного воздействия человека на природную среду. Установить эти пределы очень трудно, поскольку пороги воздействия многих антропогенных и природных факторов неизвестны. Поэтому расчёты экологического риска должны быть вероят-

ностными и многовариантными, с особым выделением риска для здоровья человека и природной среды.

Е.И. Бахарева, Д.И. Школьный, В.А. Семаков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ВЛИЯНИЕ ТАЙФУНА ХИННАМНОР НА ТРАНСФОРМАЦИЮ РЕЧНОЙ СЕТИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ В СЕНТЯБРЕ 2022 ГОДА*

Прохождение тайфуна Хиннамнор повлекло за собой интенсивный подъем уровня и значительные переформирования русел рек региона. По проведенной оценке, от затопления пострадало более 13% населенных пунктов края. Поймы рек Уссури и Малиновки в горной части были полностью затоплены. 30% длины речной сети региона претерпело трансформацию. В области наиболее интенсивного выпадения осадков деформации произошли практически по всей длине русловой сети, включая водотоки первых порядков. В качестве предпосылок развития русловых деформаций для территории при прохождении экстремальных паводков низкой обеспеченности выделены суммы выпавших за тайфун осадков, трехчасовые максимумы осадков и средневзвешенный уклон поверхности водосборов.

Приморский край зачастую подвергается воздействию обильных штормовых осадков, которые, в свою очередь, вызывают катастрофические наводнения, причиняющие колоссальный урон. Особую опасность в связи с муссонным климатом региона представляют тайфуны, возникающие летом и осенью. Прохождение тайфуна Хиннамнор в начале сентября 2022 г. привело к стремительному формированию ливневых паводков, следствием которых стала значительная интенсификация русловых деформаций.

В исследовании использовались гидрометеорологические данные и сведения о динамике русловой сети. Источником информации об осадках, уровнях и расходах стала сеть наблюдений на метеостанциях края. Ее разреженность компенсировалась использованием реанализов ERA5-Land (осадки) и GloFAS-ERA5 (расходы воды суточной дискретности). Реанализ осадков, в сравнении с наблюдаемыми на метеостанциях значениями, показал заниженные величины, однако позволил оценить пространственное распределение осадков и траектории движения ливней. Основная масса осадков выпала в южной части края в

© Бахарева Е.И., Школьный Д.И., Семаков В.А., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М. В. Ломоносова (№ 121051100166-4 – натурные исследования) при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17- 00065 – анализ последствий).

течение дня 6 сентября, к северу по побережью сумма полусуточных осадков оказалась меньше, а их выпадение было более растянутым с достижением максимума интенсивности ночью 7 сентября. Максимальные суммы осадков отмечены на территории Лазовского района и прилегающей к нему части Партизанского района – на склонах Партизанского хребта и в бассейне р. Киевки.

Анализ русловых переформирований был проведен с использованием космических снимков Sentinel-2 до и после прохождения тайфуна. В связи с масштабом исследуемой территории каждому участку русла присваивался качественный балл в зависимости от степени затронутости – от 0 (отсутствие изменений) до 2 (значительные деформации). По результатам оценки путем пространственной интерполяции по сетке для территории края был получен интегральный балл нарушенности русел.

Достоверность оценки подкреплена данными полевыми наблюдениями, выполненными в конце сентября 2022 г. по программе государственного мониторинга состояния водных объектов края. Трансформации речной сети, которые могли быть не замечены по сопоставлению снимков, фиксировались на местности.

Была выявлена высокая пространственная корреляция интенсивности переформирований, пересчитанных для ячеек сетки реанализа с метеорологическими показателями; наиболее сильная связь ($R = 0,73$) наблюдается с трехчасовыми максимумами осадков. Деление стокоформирующей территории края на элементарные водосборы разных площадей уточнило связь между интегральным баллом нарушенности, осадками и средневзвешенным уклоном поверхности, наиболее выраженную для выборки бассейнов площадью 500 км². Для наиболее затронутых паводком рек получены количественные оценки и характерные скорости экстремальных горизонтальных деформаций. Так, русла рек бассейна р. Партизанской расширились в 1,5-3 раза с отступанием берегов на 10-30 м, на отдельных участках р. Уссури в районе сел Булыга-Фадеево и Кокшаровка берег отступил на 20 м и более.

Для населенных пунктов проведена оценка степени ущерба от прохождения тайфуна, которая в том числе основывалась на мнении местных жителей. Затопления наблюдались в 15 из 27 районах края, в наибольшей степени пострадали населенные пункты в густонаселенных долинах крупных рек – Уссури, Арсеньевки, Малиновки, Киевки и Партизанской, где наблюдалось затопление всей поймы. Из поселений, расположенных в долинах малых рек, наиболее затронутыми паводками оказались Лазо, Черемшаны, Высокогорск и Ястребовка, где застройка занимает старые русла в поясе блуждания.

Актуальность исследования подкрепляется ростом количества экстремальных природных явлений, которые не поддаются точному прогнозированию. В этой связи важно минимизировать ущерб от их проявления

и выделить предпосылки в особо чувствительных районах. Данная работа предоставляет оценку возможной опасности возникновения русловых деформаций при прохождении тайфунов на территории края.

А.А. Беляков

Академия водного транспорта РВТ (МИИТ)

О ПИСЬМАХ В ЗАЩИТУ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ (1959-1987 гг.)

Выступление Н.С. Хрущева на торжественном открытии Куйбышевской ГЭС 10 августа 1958 г. ознаменовало внезапный переворот всей социально-экономической деятельности государства. Под видом переориентации электроэнергетики на будто бы «более дешевые», чем ГЭС, тепловые электростанции на угле, оно фактически ввело *табу* на постройку плотин и водохранилищ, остановило комплексную реконструкцию рек, замкнуло транспортно-энергетический комплекс на самообслуживание, а население — на обслуживание транспортно-энергетического комплекса.

Это вызвало аргументированные протесты — письма, направлявшиеся и в Госплан, и в СовМин, и в ЦК КПСС, и лично высокопоставленным персонам, и каждому очередному партсъезду, но безрезультатно. Из этих документов важнейшими представляются следующие.

Первое — письмо группы ученых и инженеров-практиков во главе с Г.М. Кржижановским (1959 г.) — немедленная реакция на затеянный Н.С. Хрущевым переворот.

Второе — письмо Романа Петровича Носова (1969 г.); ранее он был начальником Главгидроэнергостроя Министерства электростанций СССР. Этому документу свойственна обширная и очень точная технико-экономическая аргументация. К нему также приложены графики проектного и фактического финансирования (по годам) крупнейших гидроэнергетических проектов, демонстрирующие саботаж плановыми органами СССР этих проектов.

Третье — письмо главного инженера Красноярскгэсстроя Кирилла Константиновича Кузьмина М.С. Горбачеву (1987 г.). Оно даже достигло адресата, получило какие-то резолюции, и что-то, казалось, пришло в движение. Но после появления «Замечаний» работника Госплана Подольского все вновь остановилось.

Указанным документам свойственны, во-первых, ссылки на В.И. Ленина, план ГОЭЛРО, позднейшие решения партийных конференций и съездов. Разумеется, такова привычная риторика того времени. Но именно это и делает аргументацию писем бессильной: ведь в

исторической реальности и В.И. Ленин, и комиссия ГОЭЛРО, и последующие действия Партии и Правительства не давали гидроэнергетике приоритета, рассматривая ее в одном ряду с разными видами ископаемого топлива. За исключением, правда, Закона о Четвертом пятилетнем плане 1946-50 гг.: тогда война научила, что топливно-транспортная база может быть отторгнута врагом, а вода в реках течет всегда. И даже насосные станции Канала им. Москвы во время войны вынужденно работали как ГЭС (в турбинном режиме), отдавая киловатт-часы в систему Мосэнерго.

Во-вторых, в этих письмах фиксируется ставшее к тому времени привычным восприятие гидроэнергетики самой по себе, в отрыве от комплексных водохозяйственных проблем. Тем самым поддерживается и искусственное противоречие между участниками водохозяйственного комплекса при строительстве и эксплуатации водохранилищ, и противоречие между соответствующими ведомствами. Реконструкция реки в каскад водохранилищ воспринимается не как общегосударственная задача, решение которой направлено на общую пользу, а как частно-отраслевая задача электроэнергетического ведомства – отсюда и ставший привычным термин «гидроэнергетическое строительство». Даже сами водохранилища воспринимаются как принадлежность гидроэлектростанций – и в «затоплении Родины» обвиняют именно гидроэнергетику. И технико-экономические сопоставления гидроэлектростанций – исключительно внутри энергетической отрасли, с тепловыми электростанциями.

В-третьих. Всюду в письмах, где речь идет о себестоимости производства электроэнергии, она определяется по проектным и отчетным данным с учетом «амортизационных платежей» – величины фиктивной, не имеющей реального финансово-экономического смысла, и по существу являющейся не частью эксплуатационных расходов предприятия, но доходом государства как его собственника.

По официальным данным, в конце 1980-х гг. себестоимость электроэнергии на тепловых электростанциях (ТЭС) МЭ и Э СССР составляла в среднем 1,0 коп/кВтч, а на гидроэлектростанциях (ГЭС) – 0,12 коп/кВтч. Если для ТЭС доля амортизационных отчислений в себестоимости составляла в среднем 15%, то для ГЭС она превалировала, достигая 90% (на наиболее крупных ГЭС), а в среднем 80-85%. Относя к расходам только ту часть амортизационных платежей, которая шла на капитальные ремонты и потому действительно была расходом, можно утверждать, что реальная себестоимость электроэнергии ГЭС и ТЭС в последние предреформенные годы была 0,03-0,04 коп/кВтч и 0,90-0,95 коп/кВтч соответственно.

Рассмотренные 3 письма с добавлением нескольких менее значительных документов по материалам из личного архива А.А. Белякова

(1894-1992) с необходимыми комментариями и приложениями подготовлены к публикации в издательстве «Нестор-История» (Санкт-Петербург).

К.М. Беркович, Л.В. Злотина, Н.М. Михайлова, Л.А. Турыкин
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

РЕГЛАМЕНТАЦИЯ РУСЛОВОЙ ДОБЫЧИ НСМ*

Определение основных направлений минимизации отрицательно-го (для природы) эффекта добычи должно опираться на теорию русловых процессов (русловедения) и практику многочисленных примеров нарушения речных русел, полученных на основе научных натурных исследований. Современные знания о механизме влияния карьеров и, соответственно, способов оптимизации русловой добычи основаны, главным образом, на лабораторных экспериментах и теоретических проработках.

После этапа разведки обводненных месторождений НСМ и при планировании их разработки следует исходить из принципов оптимизации добычи, под которой следует понимать такой ее уровень на каждой конкретной реке или ее участке, при котором извлечение материала, как и последующее занесение карьера, оказывает минимальное неблагоприятное влияние на состояние русла и природные процессы, а также на хозяйственную инфраструктуру и инженерные. Следует учитывать долговременное влияние русловых карьеров на русловые процессы после окончания добычи, часто не менее значительные, чем трансформация русла ниже больших плотин. Кроме того, следует принимать во внимание, что разработка месторождений растягивается на многие годы и даже десятилетия, а сами они занимают многие километры рек, располагаясь группами.

Представляется, что основными условиями оптимизации добычи ПГМ из русел рек являются:

1. Выявление направленных деформаций русла реки еще до начала добычи, что делает необходимым проведение тщательных предварительных гидрологических и геоморфологических исследований. Дальнейшие ограничения могут быть актуальными только в случае обнаружения либо направленного повышения продольного профиля в результате аккумуляции наносов (например, в зонах переменного подпора водохранилищ), либо подтверждения стабильности продольного

© Беркович К.М., Злотина Л.В., Михайлова Н.М., Турыкин Л.А., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (№. 121051200166-А) при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17- 00065)

профиля – неизменности его высотного положения при минимальных межлетних расходах за длительный период времени. В случае обнаружения отрицательных направленных деформаций нижеизложенные рекомендации имеют ограниченное действие. Так, организация русловой добычи недопустима в нижних бьефах гидроузлов, где обнаруживаются направленные деформации, а также на участках рек с длительной историей разработки русловых карьеров, которая в первой половине XX века, да и позднее, никак не регламентировалась.

2. Основным средством оптимизации является ограничение объема изъятия песчано-гравийных материалов величиной стока влекомых наносов с вышележащих участков реки. Считается, что русловая добыча может выполняться без последствий пока скорость добычи не превышает скорости восстановления. Под восстановлением понимается занесение карьера наносами, поступающими с выше расположенных участков реки. Однако, скорость добычи современными техническими средствами составляет от нескольких десятков до нескольких сотен кубических метров в час. Такая же скорость восстановления, если рассчитывать на срок в один год, подразумевает, что сток донных наносов рек, который в большинстве ответственен за восстановление русла, должен достигать нескольких миллионов кубических метров в год, что нереально для многих, в частности равнинных рек. Кроме того, сток наносов большинства рек сильно меняется от года к году, поэтому в первом приближении можно ориентироваться на средний годовой сток русловых наносов, хотя расчеты транспорта донных наносов недостаточны надежны.

3. Другим способом оптимизации является регулирование габаритов карьеров: длины, ширины и глубины. С точки зрения формирования гидравлической структуры потока, как следует из работ ученых ГГИ и других исследователей, карьеры принято делить на малые и большие. Кроме того, предлагается к малым относить карьеры, если годовой объем извлекаемого материала меньше стока донных наносов на участке их размещения. При этом некоторые авторы считают, что объем карьера не должен превышать половины стока наносов, тогда он считается малым, и можно ожидать, что карьер не повлияет на уровни воды (Г.Л. Гладков). К подобному определению склоняется и Г.Г. Наумов: малым может считаться такой карьер, в результате разработки которого не происходит понижения уровня воды на верхней его кромке и не возникает условий развития регрессивной эрозии. Таким образом, малые карьеры не оказывают существенного влияния на русловый и водный режимы рек, они быстро заполняются наносами, поступающими с вышерасположенных участков рек. Предельная длина малого карьера, когда он не оказывает влияния на вышележащий участок, пропорциональна скоростному напору – согласно расчетам

Г.Г. Наумова и экспериментам американских исследователей. В подвижных песчаных и песчано-гравийных руслах крупных рек предельная длина малого (короткого) карьера не превышает нескольких сотен метров. Ограничение длины карьера будет препятствовать формированию кривой спада и ослабит развитие регрессивной эрозии, но не прекратит ее полностью, так как она будет развиваться под влиянием размыва русла ниже карьера

4. В результате отложения наносов в карьере ниже него развивается трансгрессивная эрозия. Понижение отметки водной поверхности выше карьера все равно произойдет, однако его величина будет относительно невелика и зависеть от объема карьера и скорости его занесения. Важное значение приобретает расстояние между карьерами. Так как поток оказывается недогруженным наносами, то очевидно, что расстояние до следующего карьера должно быть равно или больше, как это формулирует И.Ф. Карасев, пути насыщения, или по зарубежным формулировкам – пути адаптации. Путь насыщения пропорционален удельному расходу воды и ряду характеристик транспорта наносов. Упрощая, можно отметить, что он зависит от разности транспортирующей способности потока и реального расхода наносов на выходе из карьера. На равнинных свободных реках с песчано-гравийными наносами длина пути насыщения достигает нескольких километров. Разнесение карьеров на расстояние, большее пути насыщения, ослабит трансгрессивную эрозию, хотя и не прекратит ее.

5. Глубина карьера также должна лимитироваться, как и ширина. Карьер не должен занимать всю ширину русла, приближаясь к берегам. Разработка карьера увеличивает высоту подводного берегового откоса в несколько раз, что приводит к тому, что откос теряет устойчивость, и ее восстановление требует уменьшения угла наклона. Этот угол определяется свойствами грунта: объемным весом, углом внутреннего трения, сцеплением. Когда берег сложен супесчано-суглинистым грунтом в условиях переменного в течение года уровня воды, смены увлажнения и высыхания угол откоса может уменьшаться вдвое. Это может стать причиной интенсификации деформаций берегов, что угрожает землям, сооружениям и инфраструктуре.

6. Для размещения русловых карьеров предпочтительно использование пойменных староречий, а также мест накопления наносов, возникающих в результате регуляционных работ (пространства между выправительными сооружениями), в зонах выклинивания подпора водохранилищ и т.д. Более предпочтительна организация русловой добычи на крупных и средних реках с песчаным и песчано-гравийными наносами, с разбросанным и разветвленным на рукава руслом. Менее устойчивыми к нарушению являются меандрирующие и прямолинейные русла. Карьеры, расположенные на прирусловых отмелях и низкой

пойме, должны быть отделены от русла долговременными сооружениями (дамбами).

Ю.И. Бик, М.А. Бучельников, В.Н. Кофеева

Сибирский государственный университет водного транспорта

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ р. ОБИ В ЧЕРТЕ г. НОВОСИБИРСКА

Особенно сложными для обустройства водных путей выступают участки с комплексным воздействием на реку, прежде всего те, которые находятся в пределах урбанизированных территорий (городских агломераций). Здесь на систему поток-русло оказывают влияние транзитные и капитальные дноуглубительные прорези, разного рода русло-направляющие сооружения, строящиеся набережные, опоры мостов, действующие или заброшенные карьеры нерудных строительных материалов.

Непростая гидроэкологическая обстановка может привести к мало предсказуемым результатам: подмывам берегов, затоплением селитебных территорий, срывом гарантированных глубин на судовом ходу. Такая ситуация крайне негативно влияет и на речные экосистемы.

Актуальность исследований обусловлена значительным комплексным техногенным воздействием на реку Обь в районе крупнейшей сибирской городской агломерации – города Новосибирска.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен общий анализ воздействия на гидроэкологическое состояние различных работ, осуществляемых в русле реки;
- классифицированы факторы и причины негативного воздействия на гидроэкологические условия данного участка.

На основе анализа техногенных изменений на исследуемом участке реки предложены критерии оценки техногенного изменения береговой линии и поймы рек в условиях городских агломераций, а также проведена ретроспективная и прогнозная оценка техногенного воздействия.

Рассмотрен участок реки Обь от переката Малокривошековский до переката верхний Кудряшовский, который является одним из самых затруднительных для судоходства. На нем расположены шесть мостовых переходов и ведется строительство восьмого, а также семь перекатов.

Установлено, что в период с начала 90-х годов по 2012 год существенных изменений береговой полосы не наблюдалось.

В 2012 году началось строительство микрорайона «Европейский Берег», которое потребовало создания площадки непосредственно на берегу реки с заходом в русло. Затем, по аналогичному принципу было подготовлено место под строительство жилых комплексов «Марсель» (2013 году) и «Венеция» (2015 г.). В 2014 году введен в эксплуатацию Бугринский мост. В 2016 году открылся, была намыта строительная площадка под крупнейший в России аквапарк «Аквामир». Летом 2019 года намыта временная дамба для нужд строительства Ледовой арены. В 2020 году началось возведение опор Центрального моста.

Измерение измененных отрезков береговых линий дает возможность оценить их протяженность в процентном отношении. В пределах исследуемого участка длина левого берега составляет 16,9 км, правого 17,1. В совокупности длина береговой линии, которая подверглась, техногенным воздействиям составила 5,4 км. Таким образом, изменение береговой линии в процентном соотношении составляет 15,9%.

Можно предположить, что на гидроэкологию данного участка оказывает воздействие целый ряд техногенных факторов (перемещение аллювия, мутность, изменение ширины русла, дноуглубление), вызванных строительными работами в русле реки и ее пойме; таким образом, воздействие можно охарактеризовать как комплексное.

Очевидно, что непосредственно техногенным изменениям подвержен участок реки не на всем его протяжении, а в основном там, где осуществляется деятельность, связанная с жилищным и иным строительством, наземным транспортом. Данные работы растянуты во времени, а вызываемые изменения в русле и пойме далеко не окончательные. В настоящее время ведется строительство еще одного моста, планируется возведение нескольких набережных по левому и правому берегу.

Используя метод «Критериев экологической напряженности на реках, связанных механическими изменениями русел, влиянием гидроузлов и других водохозяйственных мероприятий» интенсивность изменений в пределах городской агломерации можно оценить, как среднюю (умеренную). Такая интенсивность может приводить к посадкам уровней, размыву отдельных участков и иным негативным изменениям.

По методу «Критериев экологической напряженности, обусловленной естественными деформациями речных русел» изменения можно оценить, как малые (число Лохтина не более 10).

Однако, использование первого метода требует уточнений, связанных с временными интервалами изменений, а второй – затруднен для использования на техногенноизменяемых участках рек.

С учетом предполагаемых изменений предлагается продолжить мониторинг Оби в пределах городской агломерации внедрить систему мониторинга, включающего в себя схему наблюдения за уровнем режимом, скоростями течений, перераспределением воды по рукавам, подтоплениями территорий, изменениями береговой линии, загрязнением воды и грунта. Для оценки опасности вторичного загрязнения вод необходимо провести масштабный отбор проб грунта и их химический анализ.

В дальнейшем необходимо разработать схему улучшения гидро-экологических условий участка в пределах городской агломерации Новосибирска и его дальнейшего развития. Такая схема должна опираться на учет интересов всех отраслей хозяйства (гидроэнергетики, строительства, водного транспорта, рекреации), в ней необходимо предусмотреть создание укрепленных набережных, пляжей для отдыха, ликвидацию подводных скальных участков и создание стабильного судового хода.

Ж.А. Буряк, П.А. Украинский

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОДИРОВАННОСТИ ТИПИЧНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ ПО МОРФОМЕТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ РЕЛЬЕФА*

Эродированность почв – результат продолжительного многофакторного процесса поверхностного и линейного смыва и линейного размыва почвогрунтов временными водными потоками. Особо актуальна задача оценки степени эродированности и моделирования эрозионных потерь почв применительно к распахиваемым угодьям, поскольку воспроизводство органического вещества в смываемых агропочвах является гарантом их стабильной продуктивности и, как следствие, национальной продовольственной безопасности. Любое моделирование и прогнозирование эрозионных рисков не может обойтись без базовой информации о фактическом состоянии почв – их степени

© Буряк Ж.А., Украинский П.А., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00169).

смытости. Для среднемасштабных оценок на региональном уровне целесообразно применять методы автоматизированного цифрового почвенного картографирования, например, с использованием регрессионного анализа, для разработки функции пространственного предсказания эродированности почвенного покрова.

Из всех факторов водно-эрозионных процессов рельеф является наиболее «стабильным» во времени: при изменяющемся режиме осадков трансформация практик землепользования различной продолжительности, которые со временем преобразовали свойства обрабатываемых почв, протекает в базовых геоморфологических условиях. Для склоновых агроландшафтов, характерных для Белгородской области (территория исследования), вклад рельефа в эрозионные процессы усиливается. Поэтому цель работы – создание в границах пашни для наиболее распространенных в Белгородской области черноземов типичных предсказательной модели степени эродированности почв исключительно по морфометрическим параметрам рельефа.

Для моделирования использовали метод порядковой регрессии, которая для точки пространства по сочетанию параметров рельефа предсказывает с известной вероятностью одну из трех градаций эродированности почв: несмытых, слабосмытых и среднесмытых (включая сильносмытые). Исходными данными служили материалы 10-го тура почвенно-эрозионного обследования, предоставленные Центром агрохимической службы «Белгородский» – 671 точка на распаханых черноземах типичных с известной степенью эродированности (несмытых – 298, слабосмытых – 239, средне- и сильносмытых – 134). Морфометрические параметры рассчитывали по цифровой модели рельефа разрешением 100 м, полученной из оцифровки топографических карт. В качестве предикторов модели из множества параметров рельефа были выбраны те, которые при полисерийном корреляционном анализе показали наибольшую тесноту связи с эродированностью при минимальной автокорреляции: уклон и индекс топографической позиции (TPI). Также в модель был включен параметр экспозиции, поскольку он достоверно выделяет среднесмытые почвы от прочих.

Создаваемая регрессионная модель предсказывает не сами порядки (категории) эродированности, а накопленный алгоритм отношения шансов (кумулятивный логит), который преобразуется в вероятность обнаружения определенной степени эродированности с помощью потенцирования. Получены следующие уравнения, составляющие модель порядковой регрессии:

$$\begin{aligned}\text{logit}_0 &= 1,19 - 0,89S + 0,46A + 0,80\text{TPI}; \\ \text{logit}_1 &= 4,09 - 0,89S + 0,46A + 0,80\text{TPI};\end{aligned}$$

$$P_0 = \frac{\exp(\text{logit}_0)}{1 + \exp(\text{logit}_0)}; \quad P_1 = \frac{\exp(\text{logit}_1)}{1 + \exp(\text{logit}_1)} - P_0;$$

$$P_2 = 1 - \frac{\exp(\text{logit}_1)}{1 + \exp(\text{logit}_1)},$$

где logit_0 , logit_1 – логит для почв соответственно несмытых, слабосмытых и несмытых; S – уклон; A – параметр экспозиции (качественная переменная, где 1 – север, 0 – юг); TPI – индекс топографической позиции; P_0 , P_1 , P_2 – вероятность для почв соответственно несмытых, слабосмытых, средне- и сильносмытых.

Все коэффициенты модели и сама модель статистически значимы. Общая точность модели равна 0,68. Для различных категорий эродированности доля правильно распознанных переменных: несмытые – 82%, слабосмытые – 56%, средне- и сильносмытые – 52%. Модель достоверно выделяет несмытые почвы от смытых, однако достаточно слабо различает степени эродированности.

Для автоматизированного эрозионного картографирования в ГИС сгенерированы растровые модели вероятности присутствия несмытых, слабосмытых и сильносмытых почв. Результирующая карта эродированности представляет собой классифицированный растр, где каждая ячейка соответствует той степени смытости, которая в данной точке имела максимальную вероятность.

Исследование показало, что в условиях слонового рельефа для предсказания наличия эродированных пахотных почв на типичных черноземах использование только геоморфологического предиктора показывает достаточно высокую точность моделирования. Однако, этого недостаточно для выделения отдельных категорий эродированности. Тем не менее, вероятностный подход открывает новые возможности для сплошного почвенно-эрозионного картографирования.

О.Г. Бушуева, А.В. Горобец, С.Ф. Краснов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭРОДИРУЕМОСТИ АГРОПОЧВ ЛЕСОСТЕПИ*

Эродируемость (смываемость) почв – понятие обратное противозерозионной стойкости, комплексная характеристика податливости почв размыву склоновыми потоками и/или ударному действию дождевых капель, а также эрозионнозначимых гидравлических параметров самих потоков [Ларионов, Краснов и др., 2022]. Нами для оценки эродируемости применялся показатель в виде частного от деления интенсивности размыва в размерности $\text{г}/(\text{м}^2\text{с})$ на куб скорости потока, который для водных потоков численно равен половине удельной мощности потока [Nearing, Bradford et al., 1991]. Теоретически правомерность использования этого параметра была показана в рамках гидрофизической модели эрозии [Ларионов, Краснов, 2000] и подтверждена экспериментально опытами по размыву почв в гидравлическом лотке [Ларионов, Бушуева и др., 2010].

Целью исследований была экспериментальная оценка изменения интенсивности размыва и эродируемости модельных образцов пахотных горизонтов выщелоченного чернозема и агросерой лесной почвы с заданной плотностью ($1,3 \text{ г}/\text{см}^3$) на струйной установке ив гидродинамической трубе в широком диапазоне скоростей потока 0,4-4,6 м/с. В качестве объекта исследований использовались образцы из пахотных горизонтов чернозёма выщелоченного, легкоглинистого, окультуренного и агросерой лесной среднесуглинистой почвы (Тульская обл.). Исследуемые почвы сильно отличаются между собой по гранулометрическому составу. Так, содержание физической глины (сумма частиц $<0,01 \text{ мм}$) в пахотном горизонте чернозема составляет 50,1%, а в агросерой почве – 35,0%.

Модельные образцы почв формировались из фракции агрегатов размером 1-2 мм, полученных из воздушно-сухих почв методом сухого просеивания. Монофракционные образцы готовились по методикам, изложенным ранее [Ларионов, Краснов и др., 2022]. Навески почв за 18-20 ч. до проведения экспериментов насыщались дистиллированной

© Бушуева О.Г., Горобец А.В., Краснов С.Ф., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ имени М. В. Ломоносова (№ 121051100166-4).

водой до влажности, равной 22 и 24% от массы воздушно-сухой почвы для агросерой почвы и чернозема, соответственно.

Проведенные опыты на струйной установке показали, что исследуемые почвы существенно различаются по интенсивности размыва и соответственно эродированности. Для чернозема характерна более низкая эродированность, чем для агросерой почвы. Так, при средней скорости потока равной 1,06 м/с эродированность чернозема в 3,9 раза ниже, чем агросерой почвы ($56,3$ и $218 \text{ с}^2/\text{м}^2$, соответственно).

Данные, полученные при размыве почв в гидродинамической трубе при различных скоростях потока, показали, что различия в эродированности между почвами еще выше. Так, например, при средней скорости потока равной 0,97 м/с эродированность чернозема составила $10,7 \text{ с}^2/\text{м}^2$. В то же время для агросерой почвы при скорости потока 1,0 м/с эродированность равна $428 \text{ с}^2/\text{м}^2$, что в 40 раз выше по сравнению с черноземом.

Сравнение величин эродированности чернозема и агросерой почвы, полученных на струйной установке и в гидродинамической трубе показывает, что размыв данных почв протекает по-разному. Например, при средней скорости потока около 1 м/с эродированность чернозема в гидродинамической трубе $10,7 \text{ с}^2/\text{м}^2$, что в 5,3 раза ниже, чем в струйной установке ($56,3 \text{ с}^2/\text{м}^2$). Напротив, эродированность агросерой почвы в трубе ($428 \text{ с}^2/\text{м}^2$) в 1,96 раза выше, чем в струйной установке ($218 \text{ с}^2/\text{м}^2$). Полученные различия указывают на необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований для изучения выявленных тенденций и механизма размыва модельных почв.

Существенным представляется снижение вариативности и возможность фиксации изменения интенсивности размыва почвы в процессе опыта. Вариативность результатов обусловлена во многом неоднородностью размываемых образцов, что затрудняет решение поставленных задач и приводит к необходимости увеличения числа повторности экспериментов. Проведенные ранее исследования показали, что неоднородность сложения модельной почвы являлась основной причиной вариативности интенсивности размыва испытуемых образцов [Ларионов, Краснов, 2000; Ларионов, Добровольская и др., 2008]. В связи с этим представляется необходимым совершенствование методики подготовки модельных почвенных образцов для обеспечения как можно большей однородности плотности их сложения [Ларионов, Краснов и др., 2022].

Таким образом, проведенные эксперименты на струйной установке и в гидродинамической трубе позволили оценить тенденции изменения эродированности модельных образцов чернозема и агросерой поч-

вы в интервале скоростей водного потока от 0,4 до 4,6 м/с. В исследуемом диапазоне скоростей потока эродируемость чернозема существенно ниже, чем агросерой почвы.

Выявленные различия в размыве почв на разных установках указывают на необходимость проведения дополнительных опытов для дальнейшего изучения механизма размыва и учета специфики формирования размывающей струи водного потока. Проведение экспериментов по размыву почв, особенно при высокой их эродируемости, требует более тщательной подготовки образцов, совершенствования средств учета и обработки данных.

А.Л. Варенов

*Нижегородский государственный педагогический университет
имени Козьмы Минина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗМЫВОВ БЕРЕГОВ МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНА КУДЬМЫ

Основными источниками информации о скоростях размывов берегов малых рек бассейна р. Кудьмы являются разновременные картографические материалы и натурные стационарные наблюдения. Выбор источников определяется их доступностью, датами отображаемых данных, возможностями определения и наложения линий береговой бровки. При этом существенное значение имеют особенности русловой динамики малых рек, среди которых значительное влияние локальных природных факторов и антропогенной деятельности человека, небольшие абсолютные значения отступания берегов (сантиметры и первые десятки сантиметров в год).

При работе с картографическими материалами следует учитывать следующее. Возможно использование только топографических планов, отвечающих требованиям к масштабу, и за значительные интервалы времени (десяtkи лет). Основные затруднения связаны с наличием планов, в принципе, и их наличием на участки русел рек, потенциальные для проявления динамики. Однако эти материалы позволяют оценить темпы общей динамики морфологически однородных участков русел, изменение отдельных форм русла в зависимости от стадий и геолого-геоморфологических условий развития, связь с циклами водности. Увеличение информативности планов может иметь место при

ускорении размывов в результате влияния человека, например, при искусственном спрямлении участка меандрирующего русла может заметно активизироваться развитие излучин ниже по течению.

Получить более конкретные данные о скоростях размывов берегов малых рек позволяют стационарные полевые наблюдения, проводимые нами совместно с сотрудниками НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева с 2010 г. Стационары расположены на 15 участках рек Кудьмы и Озерки и их притоков, разных по водности и природно-антропогенным условиям, полностью или частично охватывают формы русла в зависимости от распространения фронта размыва берегов. Чем продолжительнее ряд наблюдений, тем более детальный анализ динамики русел можно провести.

За время наблюдений применялись разные методы определения положения бровки от постоянных ориентиров (реперов, построек): метод полигонов (измерения перпендикуляров при помощи рулеток от линии между реперами), получение ортофотопланов по данным съемки квадрокоптером, съемка электронным тахеометром, съемка GNSS-оборудованием. Первый метод отличается доступностью, но при этом имеет низкую точность, определяемую количеством и направлением перпендикуляров, а также трудностями в построении планов. Второй метод характеризуется высокой скоростью работ, небольшими затратами, но его эффективность в значительной степени ограничена «открытостью» бровки от растительности; существенным его преимуществом является возможность получения изображений с распределением локальных условий размыва. Наиболее точными и удобными являются два последних метода.

Разнообразие примененных методов измерений приводит к необходимости приведения полученных данных в единую «систему» и корректировке положения бровок относительно друг друга из-за разной точности и подробности наблюдений. В решении данного вопроса помогают определение общей динамики по участкам берега, детальное описание условий размыва по точкам измерений, ортофотопланы. Указанный процесс трудоемок и предполагает использование разного программного обеспечения. Итоговое построение планов бровок и определение показателей размывов проводились в геоинформационной программе QGIS, часть процессов была автоматизирована.

Были определены следующие показатели размывов берегов: 1) протяженность размыва – линия, по которой фиксируется отступление бровки берега; 2) площадь размыва – площадь между двумя соседними бровками; 3) средняя скорость размыва в год – рассчитывается как площадь размыва, деленная на прямую линию, соединяющую на-

чало и конец участка размыва; 4) максимальная годовая скорость размыва – максимальное расстояние между соседними бровками. Чаще всего размыв имеет несплошное распространение в пределах исследуемого участка из-за влияния локальных факторов. Поэтому окончательные значения первых трех показателей определялись как среднее арифметическое.

Полученные значения размывов существенно дополняют сведения о русловом режиме малых рек.

Д.А. Вершинин

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет*

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ПРОХОЖДЕНИЯ ПАВОДКА В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОРЫВА ОЗЕРА ВЕРХНЕГО АККОЛЬСКОГО (ЮЖНО-ЧУЙСКИЙ ХРЕБЕТ, РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ) НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

Важным элементом стратегии устойчивого развития является борьба со стихийными бедствиями. Современные изменения климата способствуют интенсивной деградации горного оледенения, что в свою очередь сопровождается увеличением катастрофических экзогенных процессов. Примером этих процессов в Горном Алтае стали наводнения, вызванные сбросами ледниковых озер в 1998, 2000 и 2012 гг.

Озеро Верхнее Аккольское было открыто и нанесено на карту профессором В.В. Сапожниковым в 1898 году. В то время озеро представляло собой небольшой и неглубокий водоем, в непосредственной близости от языка ледника Софийский. За столетие озеро увеличилось в размерах, его площадь сейчас составляет 0,4 км², ледник за это время отступил на 1,8 км. Питание озера осуществляется преимущественно за счет таяния ледников, частично дождями и снегом. Из озера вытекает река Аккол длиной 20 км, в 10 км ниже истока река протекает через озеро Нижнее Аккольское, площадью 0,64 км². Р. Аккол сливаясь с р. Караюк, образует р. Чаган. В 17 км ниже Чаган сливается

© Вершинин Д.А., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке Азиатско-Тихоокеанской сети исследований глобальных изменений, проект CRRP2021-03MY-Borodavko “Оценка опасности наводнений, вызванных выбросами ледниковых озер на Российском, Монгольском и китайском Алтае”, грант DOI: <https://doi.org/10.30852/p.18092>.

с р. Талдура и образует р. Чаган-Узун. Чаган-Узун впадает слева в р. Чуя у пос. Чаган-Узун в 175 км от ее устья. Руслу рек местами скальные, в расширениях речных долин разветвленные, дно сложено галькой и валунами. Ширина русел на однорукавных участках 15-30 м.

Для создания основы цифровой модели рельефа (ЦМР) долин рек использовались данные дистанционного зондирования земли ASTER Global DEM. Для уточнения рельефа русел рек использовался картографический материал и спутниковые снимки из общедоступных сервисов. Полученная ЦМР импортировалась в моделирующую систему HEC-RAS версии 5.0.7 во встроенный в систему программы по работе с ГИС данными инструмент RAS-Mapper, где с помощью инструмента Geometric data на цифровую модель рельефа была нанесена расчетная сетка 2D ячеек, заданы параметры коэффициентов шероховатости. Были построены несколько вариантов 2D-моделей как для отдельных участков долины рек Аккол, Чаган, Талдура, Чаган-Узун и Чуя, так и для всего участка от озера Софийского до створа на р. Чуя ниже пос. Чаган-Узун. Общее количество ячеек для 10-метровой регулярной сетки составляет приблизительно 1098 тыс. ячеек. Длина смоделированного участка – рек Аккол, Чаган, Талдура, Чаган-Узун и Чуя 60 км. Коэффициент Маннинга, равный 0,035, использовался для всех ячеек.

Для решения задачи моделирования паводка был применен метод неустановившегося движения воды путем задания гидрографа стока во входных створах моделей в период максимальной водности с дискретностью 1 час в течение 4-х суток. Максимальные расходы р. Чаган у пос. Бельтир наблюдаются в июле и составляют, в среднем, 25-35 м³/с, максимальный за весь период наблюдений расход воды составил 65,5 м³/с. Расходы р. Талдура были определены в период полевых наблюдений, выполненных лабораторией гляциоклиматологии ТГУ в 1977 г. и составляют, в среднем 60 % расходов р. Чаган. В расчетный гидрограф вошли реальные расходы воды, наблюдавшиеся в период параллельных наблюдений на реках Чаган и Талдура. Расходы реки Чуи измерялись в створе у пос. Чаган-Узун и в период паводков составляют 60-120 м³/с.

Было изучено несколько мгновенных сбросов озерной системы в долине р. Аккол. Общий объем воды в озерах составляет 7,3 млн. м³. Наиболее неблагоприятным представляется сценарий полного сброса всей озерной системы в течение 4-х часов с постоянным расходом воды 492 м³/с.

Результаты моделирования следующие:

– при выходе волны паводка на участок расширения долины р. Чаган (1-6 км выше пос. Бельтир) ширина потока увеличивается до

200-500 м, глубины изменяются от 0,5-1,0 м до 2,5-3,5 м, скорости течения увеличиваются от 2,0 до 4,0 м/с;

– в пос. Бельтир в зоне затопления оказываются несколько домовладений, в некоторых из них глубины достигают 1,2 м, ширина разлива р. Чаган-Узун в отдельных местах превышает 500 м;

– в узкой части долины р. Чаган-Узун уровни воды на пике паводка повышаются на 1,0-2,0 м, скорости течения увеличиваются более чем вдвое – от 1,8-2,2 до 4,5-5,0 м/с;

– в расширении речной долины ширина потока увеличивается до 150-200 м, а в наиболее широких местах 400-500 м, максимальные скорости течения вырастают от 1,3-1,5 до 2,5-3,0 м/с;

– отметки водной поверхности на пике паводка у пос. Чаган-Узун повышаются на 1,3-1,5 м;

– около 134,5 тыс. м² территории пос. Чаган-Узун окажется под водой.

Данный сценарий не является окончательным и полностью точным, поскольку используемая нами ЦМР не позволяет точно идентифицировать русло реки и его структурные элементы в пределах речной долины. Мы также не учитывали влияние мостов через реки Чуя и Чаган-Узун как препятствий при прохождении паводка. Эти неопределенности могут быть устранены путем проведения более детальной топографической съемки долины реки с измерениями глубины в ключевых местах и дополнением модели данными о мостах с их точными параметрами.

А.Ю. Воробьев, А.С. Кадыров

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина

О СВЯЗИ АЛЛЮВИАЛЬНОЙ АККУМУЛЯЦИИ В БАСЕЙНЕ СРЕДНЕЙ ОКИ С СИНОПТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ХОЛОДНОГО ПЕРИОДА ГОДА *

Флювиальные рельефообразующие процессы являются ведущими в пределах бассейна реки Оки. Их динамика в днище долины главной реки находит морфологическое выражение в разрушении речных берегов и накоплении наносов на аккумулятивных русловых отмелях. Устойчивость и типичность эрозивно-аккумулятивных процессов на юго-востоке Мещерской низменности подтверждается эволюцией ок-

© Воробьев А.Ю., Кадыров А.С., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 22-77-00050).

ской долины в геологическом масштабе времени. Ее пойменная часть может по праву считаться результатом многолетней работы русла Оки, причем аккумулятивные тенденции в ее пределах на протяжении тысячелетий преобладали над выносом материала. Радиометрические данные свидетельствуют о голоцен-плейстоценовом возрасте оснований пойменных массивов, в том числе и тех, которые развивались унаследовано на более древних водно- и озерно-ледниковых отложениях. Возраст самых молодых комплексов рельефа насчитывает, по крайней мере, столетия, но многие участки днища долины Оки начали формироваться еще в конце плейстоцена, более 12 тысяч лет назад.

Поемность и аллювиальность в голоцене были неустойчивыми в средней части окского бассейна, где днище долины местами расширяется до 8-12 км. В эпохи пониженной флювиальной активности рельеф большей части таких расширений практически консервировался, начинался очередной этап зонального развития почв с преобладанием постлитогенных тенденций. Рельеф и ландшафты отражали последовательные изменения климата прошлого, вплоть до таких фундаментальных результатов палеоклиматической динамики, как смещение границ природных зон.

Не только древняя, но и современная динамика рельефообразования окской поймы испытывает воздействие регионального макроклимата. Главную роль в этом случае начинают играть сезонные циркуляционные процессы, отражающиеся и в водном режиме водотоков окского бассейна. Весенние половодья являются главным рельефообразующим событием для днища окской долины, образование новейшей поймы на прирусловых отмелях осуществляется именно после прохождения паводковой волны. Однако параметры половодья, сроки его наступления и завершения и геоморфологические последствия в последние годы отличались сильной изменчивостью, о чем свидетельствуют результаты наших полевых исследований. Вслед за неустойчивым водным режимом Оки и ее главных притоков в среднем течении отмечалась и нестабильность вещественного состава аккумуляровавшегося аллювия, а также его объема на обновляющихся формах пойменного рельефа. В отдельные годы аккумуляция наилка фиксировалась только на прирусловой пойме, участки, занимающие центральные и притеррасные позиции в пойме при этом не затопливались. Вовлеченность днища речной долины в рельефообразование, таким образом, напрямую зависит от стока воды в рамках тысячелетних, сверхвековых, десятилетних и внутригодовых его колебаний.

Смена сезонов года, для каждого из которых характерен собственный перечень действующих в долине Оки агентов рельефообразования, прослеживается благодаря непродолжительным атмосферным проявлениям. Синоптический временной масштаб (несколько суток) подобных сигналов представляет наибольший интерес в рамках рас-

смотрения физико-географической связи современного климата окско-го бассейна и трендов регионального осадконакопления. Для большинства рельефообразующих процессов в окской пойме, в том числе, и аллювиальной аккумуляции, характерна резкая остановка после прекращения действия инспирирующего их фактора. Передача информации от атмосферного к литосферному компоненту природно-территориальных комплексов реализуется через доставку талого стока в гидрографическую сеть и последовательность гидрологических событий (фаз гидрографов Оки и ее притоков). Формирование пологоводного пойменного рельефа, является конечным результатом передачи энергии и информации от самого лабильного ландшафтного компонента (климата) к самому устойчивому – рельефу. Для геологического прошлого причинно-следственные связи отдельных метеорологических событий, либо их последовательностей с рельефообразованием отследить затруднительно или вовсе невозможно. Однако в отношении актуальных процессов аналитическая работа упрощается, поскольку исследователь владеет данными инструментальных наблюдений за региональной динамикой метеорологических элементов и гидрологических параметров водотоков.

Еще в первой половине XX века было предложено выделять типы весен, в зависимости от того, какой метеорологический фактор снеготаяния преобладает. Современная практика учета динамики метеозлементов холодного сезона года применяется для прогнозов половодья в качестве входных параметров расчетных моделей. Между тем, экстремальные значения этих элементов, и, соответственно, тип весны, отвечают последовательности синоптических процессов за тот или иной временной интервал в границах речного бассейна. Зачастую и отдельные атмосферные проявления синоптического масштаба могут вызвать выраженную гидрологическую реакцию, переходящую затем в эрозионную работу русла реки. Вторжение южного циклона, например, приводит зимой к оттепели, активизирующей снеготаяние на водосборах Оки. Такие последовательности событий неоднократно регистрировались в 2010-е годы, результатами их были зимне-весенние паводки или аномально ранние половодья. Аккумуляция аллювия и обновление поверхности пойменного рельефа в таких условиях сосредотачивались в прибрежной зоне молодой поймы, причем собранный нами наилок существенно отличался по своим литологическим параметрам от ожидаемых значений.

При обращении к метеорологической динамике удобно выделять отдельные синоптические ситуации и отслеживать гидрологический сигнал от них. Синоптические ситуации проявляются в устойчивых особенностях циркуляции в атмосфере и за многие десятилетия исследований накоплен значительный опыт их классификации. Элементарные циркуляционные механизмы (ЭЦМ) – термин, введенный извест-

ным климатологом Б.Л. Дзердзеевским, обозначает погодные ситуации в атмосфере Северного полушария. Типизация ЭЦМ уже к началу XX века позволила выделить как годы с преобладанием того или иного типа атмосферной циркуляции (например, широтной), так и аналогичные эпохи продолжительностью 10-20 лет и более. Классификация учитывает секторность Северного полушария, причем ежедневный мониторинг синоптических процессов осуществлялся 120 лет (с 1899 года по 2019 год), результаты его обобщены в специальном календаре. Для европейского сектора, где находится бассейн Оки, обособлены характерные шаблоны положения метеорологических полей, при которых активизируется вынос тепла или холода из различных районов Евразии и окружающих ее морей.

Разработка перспективного междисциплинарного направления исследований в данном контексте может сосредоточиться на обосновании «быстрого» отклика флювиальной системы окского бассейна на отдельные ЭЦМ. Другой задачей является выделение влияния последовательностей ЭЦМ в холодный период года на ход весеннего половодья и обусловленную ими динамику рельефообразования. Целесообразно сосредоточиться при этом на эрозионно-аккумулятивных процессах приречной поймы Оки, поскольку обеспеченность затоплением здесь наиболее велика. Кроме того, высокая центральная пойма, как и в голоцене, должна быть относительно менее восприимчива к реализациям взаимосвязи климата и рельефа. Между тем, степень устойчивости ее рельефа по отношению к атмосферным сигналам, возбуждающим эрозию и аккумуляцию, остается неизвестной. Неясно также, какие именно сигналы приводят к затоплению поймы, разрушению берегов и усиленному накоплению аллювия. Все же, несмотря на опосредованный характер разрабатываемой связи, упомянутая перспективная работа является примером следования морфоклиматическому подходу в динамической геоморфологии.

Ю.Е. Воронина, М.В. Шестова, А.Н. Ситнов

Волжский государственный университет водного транспорта

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СУДОВОГО ХОДА
НА ПЕРЕКАТНОМ УЧАСТКЕ В РАЙОНЕ СТРОЯЩЕГОСЯ
МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА НА р.ОКЕ (г. НИЖНИЙ НОВГОРОД)
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ РЕЧНОГО ПОТОКА**

Целью выполненных исследований явилось определение влияния технологии строительства мостового перехода по объекту «Дублер пр. Гагарина в г. Нижний Новгород (4 очередь)» на русловые процессы р.Ока и на устойчивость судового хода в районе строительства.

Объект исследования включал участок р.Ока протяженностью 20 км – выше на 5 км створа будущего мостового перехода и до места впадения в р. Волга. Створ проектируемого мостового перехода расположен в 15,1 км от устья р. Ока. В его районе русло реки относительно прямолинейно. Выше створа перехода примерно в 700 м в русле реки расположен остров, поросший древесной и кустарниковой растительностью.

В границах рассматриваемого участка р.Ока имеется много инженерных сооружений. Ниже створа мостового перехода находятся четыре моста: Мызинский (на 10.4 км от устья), Молитовский (на 4.5 км), метромост (на 2.2 км) и Канавинский (на 1.1 км). Непосредственно в районе строительства моста имеются три водозабора.

По плану строительства проведение работ по возведению опор будущего моста сопровождается разработкой на участке мостового перехода дноуглубительных прорезей значительной протяженности (960 м), а также технологических площадок, требующих увеличенной глубины для базирования участвующего в строительстве моста технического флота.

На участке р. Ока во время строительства мостового перехода и после окончания возведения опор в эксплуатационный период транзитное судоходство должно осуществляться в полном объеме без ухудшения существующего состояния водного пути. Для решения задачи по организации строительного процесса и оценке влияния проводимых работ на устойчивость судового хода выполнено математическое моделирование гидродинамики речного потока.

С учетом технологических особенностей строительства моста были созданы и промоделированы 16 расчетных вариантов для восьми моделей (этапов строительства). Модели этапов производства работ

приняты в соответствии со схемами строительства моста. Их разработка выполнена с учетом детальной конфигурации русла. Математические модели создавались при условии прохождения двух расходов воды – низкого (проектного), равного $560 \text{ м}^3/\text{с}$ и высокого, соответствующего руслоформирующему расходу $2420 \text{ м}^3/\text{с}$. В качестве руслоформирующего рассматривался расход воды, для которого характерны наиболее интенсивные русловые деформации.

На основании полученных результатов математического моделирования были сделаны следующие выводы.

1. При низком расходе воды.

Строительство технологических площадок и возведение опор моста оказывает влияние на русловые процессы и устойчивость судового хода на участке до устья р. Ока, причем на разных этапах строительства это влияние специфично. Однако, по окончании строительства и разбора всех стесняющих русло вспомогательных технологических элементов происходит определенная стабилизация потока.

2. При высоком расходе воды.

Характер и направленность русловых деформаций при высоких и низких уровнях воды идентичны. Отличие заключается в интенсивности протекающих русловых переформирований.

Водозаборы Малиновая Гряда, Автозаводская ТЭЦ оказываются в неблагоприятных условиях эксплуатации, так как оказываются в зоне активных русловых деформаций. Однако, после разбора всех технологических площадок и сооружений, т.е. после окончания строительных работ, состояние русла в их зоне постепенного возвращается к своему естественному состоянию.

Все строительные работы необходимо вести совместно с дноуглубительными работами при любых уровнях воды, чтобы не спровоцировать значительные негативные русловые деформации от максимального стеснения русла р. Ока.

Таким образом, на основе полученных результатов даны рекомендации по оптимальным условиям возведения будущего мостового перехода по объекту «Дублер пр. Гагарина в г. Нижний Новгород (4 очередь)» в целях снижения негативного влияния строительства объекта на русловые процессы и судоходство.

ВЛИЯНИЕ НИЖНЕКАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА ФОРМИРОВАНИЕ УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЕЙ МАЛЫХ РЕК

В результате перестройки сложнейших природных систем в условиях антропогенного влияния изменяется облик нижнего течения малых рек. Так, заполнение Нижнекамского водохранилища в 1979 году определило начало нового этапа в формировании устьевой области малых рек, до его создания впадавших непосредственно в Каму. Наибольшие преобразования испытывают реки, устье которых располагается в пределах города Набережные Челны. Это малые реки Шильна и Челна – левые притоки р. Камы (таблица 1).

Таблица 1. Основные сведения о реках, впадающих в Нижнекамское водохранилище в пределах города Набережные Челны

Название реки	Длина, км	Площадь бассейна, км ²		
		по правому берегу	по левому берегу	суммарная
Шильна	39.2	233.562	101.103	334.665
Челна	30.8	210.324	149.232	359.556

Несмотря на схожие параметры, Шильна и Челна имеют, как сходства, так и различия в строении устьевой области.

Анализ топографических карт 1954 года съемки показывает, что обе реки в устьевой части имели прямолинейный участок: а) у Шильны он был длиной 3 км, шириной русла 77 м; выше по течению от прямолинейного участка река сильно меандрировала в пределах широкой поймы с абсолютными высотами 58.9-60.9 м. б) у Челны длина участка составляла около 400 м и ширина русла – 40 м. Отличия состоят в том, что прямолинейный участок Челны имел северо-западное направление и непосредственно открывался в русло Камы, тогда как у Шильны направление течения было противоположное основному течению Камы (север-северо-западное). Цепь узких озер и отрезок длиной 320 м русла Шильны в южном направлении свидетельствовали о возможном в недалеком прошлом стоке этой реки на юг. В таких случаях возникал остров вдоль левого берега Камы в районе устья Шильны. Максимальная абсолютная высота в пределах острова составляла 64 м, относительная – около 3 м.

Река Челна в своем нижнем течении имела обрывистые берега: от 3 до 5 м – левый и от 3 до 20 м – правый, огибая крупный останец, на котором располагается район Набережных Челнов – Элеваторная гора. На расстоянии 800 м от своего устья она принимала последний из притоков – левый приток р. Мелекеску.

Заполнение Нижнекамского водохранилища проходила в два этапа. В 1979 году оно было заполнено до отметки 62 м, а в 2003 г. – до 63,3–63,5 м. Строительство водохранилища привело к затоплению участков малых рек в нижнем их течении. В результате анализа космических снимков выявлены следующие особенности строения образовавшихся устьевых областей Шильны и Челны, возникшие после затопления водохранилища. В строении устьевой области Челны можно выделить три основные части: устьевой участок реки, эстуарий и устьевую зону приемного водоема (по В.Н. Михайлову). В строении устьевой области Шильны выделяются четыре части: устьевой участок, «дельта», эстуарий и устьевая зона Шильны в приемном водоеме. «Дельта», расположенная на месте широкой поймы с развитыми меандрами реки, в настоящее время представляет собой многорукавное образование, с множеством озер, разделенных зарослями рогоза. Вдоль левого берега водохранилища сохранилась северная часть острова в виде цепи небольших островов, отделенных от берега протокой шириной 280–290 м, ранее являвшейся руслом реки Шильна. Учитывая преобладающие абсолютные высоты в пойме Шильны, при строительстве водохранилища должна была быть затоплена большая по площади территория. Однако возможно этому воспрепятствовала дорожная насыпь, пересекающая пойму Шильны в направлении север-юг, которая читается на космическом снимке и хорошо различима на местности.

Новое образование устьевой области малой реки – притока водохранилища наследует особенности строения долины в нижнем ее течении. Различия в строении устьевой области Шильны и Челны в настоящее время объясняются отличиями в строении их долин и устьевой части до строительства водохранилища. Т.е. по сути они имеют реликтовый характер.

Изучение особенностей формирования устьевой области малых рек-притоков водохранилища имеет большое геоэкологическое значение. Располагаясь в пределах Набережных Челнов, затопленное устье реки Челна и ее притока Мелекески в настоящее время представляет собой рекреационную зону города. Устьевая область Шильны ее дельта и эстуарий – это район обитания редких птиц и водных растений, занесенных в Красную книгу.

А.М. Гареев

Уфимский государственный университет науки и технологий

**ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РУСЕЛ И СТОКА
МАЛЫХ РЕК В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ**

В условиях влияния продолжительной деятельности большого количества предприятий, относящихся к горнодобывающей отрасли, в бассейнах малых и средних рек происходят коренные изменения, проявляющиеся в изменениях морфометрических характеристик русел, гидрологического режима, речного стока (в т.ч. и водно-ресурсных показателей), гидрохимического и экологического состояния самих водных объектов. Существенное влияние при этом оказывают процессы, обусловленные глобальным изменением климата. В этих условиях проявляется необходимость всестороннего изучения значимости влияния естественных и антропогенных факторов, соответственно, обоснования необходимых мероприятий, направленных на восстановление русел малых рек и их благоприятных гидролого-экологических показателей.

Указанные процессы достаточно отчетливо проявляются в пределах обширной территории, расположенной вдоль восточного склона Южного Урала, а также прилегающих возвышенностей. Характерной особенностью указанной территории является то, что здесь расположено большое количество горно-обогатительных фабрик (ГОК), расположенных меридионально в пределах Южного Зауралья. Продолжительная добыча руд цветных металлов, их обогащение на ГОК сопровождаются формированием техногенно-нарушенных территорий различного характера (карьеров, отвалов горных пород, хвостохранилищ и др.), которые привели к коренному преобразованию русел некоторых малых рек, бассейны которых расположены в зоне воздействия указанных объектов. Произошло изменение гидрологического режима, количественных и качественных характеристик водных объектов, соответственно, резкое ухудшение экологических условий в них. В числе наиболее показательных в данном аспекте следует привести места расположения добычи руд цветных металлов по бассейнам малых рек и их обогащения в городах Карабаш (Челябинская обл.), Учалы, Сибай, п. Бурibай (Республика Башкортостан) и Медногорск (Оренбургская обл.).

Сложная ситуация сложилась и сохраняется до настоящего времени по рекам Карагайлы и Худолаз, которые в течение продолжительного времени испытывают чрезмерное влияние объектов, расположенных в окрестностях г. Сибай. Останавливаясь более подробно на

примере бассейнов указанных рек, отметим то, что Сибайская обогатительная фабрика (СОФ) введена в эксплуатацию в 1959 году производительностью 2500 тыс. т руды в год. Проектом реконструкции в 1972-1975 гг. предусмотрена годовая производительность 3200 тыс. т. В настоящее время в зоне влияния на русла рек Карагайлы и Худолаз расположены три карьера и отвалы горных пород, старое и новое хвостохранилища и др., занимающие большие площади. Отвалы сложены спилитами, риолитами, кварцевыми риолитами, туфами и туфобрекчиямиспилитов, и кварцевыхриолитов, хлорит-серицит-кварцевыми, серицит-кварцевыми и хлорит-кварцевыми метасоматитами, глинами. Породы содержат примеси сульфидных минералов: пирита, сфалерита, халькопирита и др. Отвал представляет собой сложный геохимический фильтр, включающий в себя последовательно действующий испарительный, криогенный, окислительно-восстановительный, кислотно-щелочной, температурный геохимические барьеры. В результате первоначального обустройства, в последующего расширения зон влияния техногенно-нарушенных территорий по р. Карагайлы произошли следующие изменения:

- перенаправление стока указанной реки в русло другой реки Камыш-Узяк, протекающей севернее;
- формирование отвалов горных пород, занимающих значительные площади, в том числе водосбора, водоохранных зон и русла самой реки;
- полное прекращение стока и пересыхание русла реки Карагайлы в зоне складирования отвалов горных пород;
- возобновление стока реки вновь ниже нарушенного участка на расстоянии примерно 0, 7 км в результате поступления родниковых вод, стекающих со склона долины указанной реки;
- полное нарушение, гидрологического режима, чрезмерное загрязнение речных вод и донных отложений;
- формирование участка реки, лишенного условий обитания многих видов высших гидробионтов и др.

Таким образом, указанные факторы явились причиной коренной техногенной трансформации русла и стока малой реки, протекавшей в зонах влияния объектов горнодобывающей отрасли, соответственно, неблагоприятных экологических условий.

На основании проведения широкомасштабных изысканий и исследований в 2020 г, нами обоснованы методические положения, направленные на гидролого-экологическую реабилитацию р. Карагайлы, восстановление водоохранных зон, а также рекультивацию и ландшафтно-экологическое благоустройство нарушенных территорий, включая восстановление морфометрических характеристик русла и гидрологического режима самой р. Карагайлы, гидролого-экологических условий в ней, приближенных к естественным.

А.М. Гафуров, М.А. Иванов
Казанский федеральный университет

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ГРАНИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

Точное определение границ сельскохозяйственных угодий представляет собой актуальную проблему в современной науке и практике, особенно в контексте растущих требований к эффективности и устойчивости сельскохозяйственного производства. Ландшафтная характеристика сельскохозяйственных угодий, а также динамика их изменений, оказывают значительное влияние на формирование урожайности и прогнозирование рисков, связанных с климатическими изменениями.

Применение глубоких нейронных сетей в этой области открывает новые перспективы, позволяя автоматизировать процесс распознавания и классификации земельных участков. При этом, данные дистанционного зондирования Земли, включая многоканальные спутниковые изображения и данные LIDAR, могут служить основным источником информации для обучения и работы таких моделей. Однако, разработка и применение глубоких нейронных сетей в этом контексте требует преодоления ряда научных и технических проблем. Прежде всего, требуется большое количество качественных обучающих данных, что в свою очередь подразумевает выполнение трудоемкой работы по разметке изображений и определению границ сельскохозяйственных угодий. Кроме того, для обучения и работы сложных нейронных моделей необходимы значительные вычислительные ресурсы. Важным фактором является также выбор архитектуры и параметров модели, а также методов ее обучения и оптимизации, что требует глубокой экспертизы в области машинного обучения. Наконец, необходимо учесть ряд специфических особенностей, связанных с обработкой географических данных, включая их пространственную структуру и корреляцию, а также проблемы, связанные с изменением масштаба и перспективы изображений.

В качестве территории исследования был выбран Буинский муниципальный район. Буинский район – это район, расположенный в Республике Татарстан, которая является субъектом федерации России. Район расположен в западной части Татарстана и занимает площадь около 1 500 квадратных километров. Он граничит с Апастовским рай-

© Гафуров А.М., Иванов М.А., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-27-00292).

оном на севере, Тетюшским районом на востоке, Дрожжановским районом на юге и Яльчикским районом Чувашской Республики на западе.

Для решения задачи семантической сегментации, то есть выделения границ пашни была использована архитектура Linknet – это архитектура глубокой нейронной сети, которая широко используется для задач сегментации изображений. Она основана на полностью сверточной сети (FCN) и имеет структуру кодер-декодер с пропусками между кодером и декодером. Пропускные соединения помогают сохранить пространственную информацию в процессе передискретизации и позволяют декодеру обучаться на основе характеристик высокого разрешения кодера. Это делает Linknet хорошо подходящей для таких задач, как обнаружение и сегментация объектов. Для дальнейшего повышения производительности Linknet было применено трансфертное обучение с использованием предварительно обученных моделей. Одной из часто используемых предварительно обученных моделей является EfficientNet, которая представляет собой семейство архитектур глубоких нейронных сетей, масштабируемых по размеру и сложности для повышения производительности при решении широкого круга задач. EfficientNetB3 – одна из наиболее часто используемых версий, которая показала превосходную производительность по сравнению с другими предварительно обученными моделями, такими как ResNet и Inception.

Обучение, верификация и применение модели было произведено на основе космических снимков Sentinel 2. Снимки Sentinel 2 широко признаны как один из лучших источников данных для определения границ сельскохозяйственных полей. Для анализа был использован трехканальный композитный снимок Sentinel 2 за вегетационный период 2020 года, где в качестве 1 канала использовался показатель стандартного отклонения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), в качестве 2 канала – инфракрасный диапазон спектра (833-835.1 нм), в качестве третьего канала – красный канал (664.5-665 нм). Такая комбинация позволяет лучше выделить почвенную линию, что теоретически должно соответствовать грунтовым дорогам, разделяющим пашни, а также отсеять лесные участки, а также пастбища, имеющие меньшую вариабельность в вегетационной кривой, нежели распаханые угодья. Полученный композит был конвертирован в формат uint8 с отсечением 5% перцентилей для минимизации влияния шумов и соответствия 8 битной цветовой шкале в каждом канале, что является обязательным условием для распознавания образов с использованием сверточных нейронных сетей.

Обучение нейронной сети производилось итеративно на протяжении 87 эпох, после которой уменьшение функции ошибки прекрати-

лось, остановившись на значении 0.07. Точность выделения границ на тестовой выборке, не участвующей в обучении, составила 86,3 % при значении f1-меры равной 0,924. Визуально оценивая результаты распознавания, следует отметить высокую степень соответствия предсказанных границ полей и реальных, полученных экспертным путем. Имеющиеся шумы могут быть отфильтрованы с использованием матричных фильтров, а также подбором соответствующего значения интенсивности яркости пикселя при переклассификации на объекты пашня-фон. Стоит отметить, что границы пахотных угодий не всегда удалось разделить друг от друга. Связано это с тем, что исходного разрешения снимков Sentinel 2 (10 м) не всегда достаточно, когда пашни разделены грунтовыми дорогами или узкими лесополосами. В целом же способность модели к распознаванию границ пашни можно оценить на достаточно высоком уровне.

Г.Л. Гладков, П.В. Беляков, Ю.П. Соколов, П.С. Ржаковская

*Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СУДОХОДСТВА НА ТРАССЕ КАСПИЙ-АЗОВ В УСЛОВИЯХ ПРОДЛЕННОЙ НАВИГАЦИИ

По материалам многолетних наблюдений на стационарных метеостанциях и гидрологических постах, расположенных в бассейнах нижней Волги и нижнего Дона, определены основные климатообусловленные тренды изменения климатических, гидрологических и ледовых характеристик: произошло повышение температуры воздуха с конца 70-х годов XX века со значимым положительным трендом; имеет место тенденция увеличения зимнего стока рек. При этом относительная доля весеннего стока в годовом стоке уменьшается; средние даты начала ледовых явлений сместились на более поздние сроки, а средние даты окончания ледовых явлений за последний 30-летний период сместились на более ранние сроки; наблюдаются более длительные периоды шугоходов; происходит уменьшение средних и особенно максимальных значений толщины льда.

В водораздельных бьефах и слабопроточных водохранилищах, расположенных на основной трассе ВДСК, климатообусловленные

изменения характеристик водного режима происходят с меньшей интенсивностью, чем на речных участках Волги и Дона.

В зимний период времени на нижней Волге отсутствует необходимость осуществления дополнительных попусков воды из Волгоградского водохранилища для обеспечения круглогодичной навигации с учетом обеспеченности водными ресурсами в современных условиях и на перспективу. Организация круглогодичной навигации на нижней Волге не затрагивает интересы других водопользователей.

На период продленной навигации для участка судоходной трассы распространяется действие установленных значений категории водного пути, гарантированных габаритов водного пути и отметок проектного уровня воды на опорных гидрологических постах. В течение всего периода продленной навигации на внутренних водных путях осуществляется обязательное лоцманское сопровождение. При появлении ледовых образований на трассе водного пути плавание судов осуществляется с ледокольным обеспечением. С момента установления устойчивого ледового покрова на трассе водного пути в соответствии со ст. 77 КВВТ устанавливаются ограничения на условия движения судов.

Технические и организационные мероприятия по содержанию судовых ходов в период продленной навигации выполняются с отступлениями от действующих правил содержания судовых ходов и судоходных гидротехнических сооружений. Контроль за чистотой судовых ходов осуществляется с использованием специализированных ледокольных судов, обеспечивающих проводку на трассе водного пути.

Путевые работы, выполняемые на внутренних водных путях для содержания судовых ходов, в весенний период продленной навигации осуществляются с момента освобождения участка водного пути ото льда, а в осенне-зимний период до момента появления первых ледовых образований на трассе водного пути.

Навигационно-гидрографическое обеспечение судоходства в период продленной навигации осуществляется с учетом основных положений (в период продленной навигации и возможного плавания судов в ледовых условиях плавучие знаки будут отсутствовать, за исключением знаков, предназначенных для круглогодичной эксплуатации и т.д.). Для обеспечения продленной навигации необходимо реализовать следующие программы мероприятий по навигационно-гидрографическому обеспечению условий плавания судов: обновление нормативных документов; внедрение автоматизированных водомерных постов; оптимизация системы информирования судоводителей о путевых условиях плавания и т.д.

Для оценки климатических рисков при организации продленной навигации были определены основные факторы, влияющие на безопасность судоходства. Полученные результаты показали, что основные риски связаны с глубиной реки (уровнем воды) и ледовыми явлениями. Риски, связанные с продолжительностью ледовых явлений, уменьшаются в последние десятилетия, что в первую очередь связано с увеличением температуры воздуха, а анализ рисков, связанных с глубиной реки, на основе данных по минимальным ежедневным уровням воды показал аналогичную тенденцию уменьшения рисков на участке водного пути Каспий-Азов.

Дефицит водных ресурсов для обеспечения судоходства в нижнем бьефе Цимлянской ГЭС будет ликвидирован после ввода в эксплуатацию Багаевского гидроузла на реке Дон. Лимит водопотребления на шлюзование Волго-Донского судоходного канала в среднемноголетнем укрупненном водохозяйственном балансе Цимлянского водохранилища составляет около 0.65% от общего объема приточности к водохранилищу. Дополнительный водозабор на обеспечение работы ВДСК в период круглогодичной навигации составит менее 1/3 этой величины и не окажет заметного влияния на расходную часть водохозяйственного баланса водохранилища.

При рассмотрении круга вопросов, связанных с организацией движения судов по внутренним водным путям в условиях продлённой навигации следует опираться на обширный опыт организации работы администраций российских устьевых морских портов, а также на опыт эксплуатации судов внутреннего и смешанного плавания в ледовых условиях.

В.Н. Голосов^{1,2}, Е.Н. Шамшурина^{1,2}, А.П. Жидкин², Г.И. Колос¹
¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*
² *Почвенный институт им. В.В. Докучаева*

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНОК СМЫВА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ НА МАЛОМ ВОДОСБОРЕ ПО ЭРОЗИОННЫМ МОДЕЛЯМ НА ОСНОВЕ ОЦЕНОК ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОСОВ ПОЛЕВЫМИ МЕТОДАМИ*

В зоне серых лесных почв на Среднерусской возвышенности оценка темпов эрозионно-аккумулятивных процессов с помощью эрозионного моделирования и верификация полученных данных с помощью радиоцезиевого и почвенно-морфологического метода проведена впервые. Исследования проводились в Мценском районе Орловской области на водосборе «Ломовец» – основной части водосбора оврага, на левобережье р. Оки рядом с д. Ломовец. Исследуемая часть водосбора оврага в основном залесённая. Площадь пашни 41 га, площадь ложбины 1,01 га. По ложбине сток воды направляется к вершине активно растущего оврага. Грунтовая дорога при пересечении ложбины несколько поднята относительно её днища, создавая подпор и способствуя переотложению наносов, транспортируемых временными водотоками при выпадении стокоформирующих ливней или в период снеготаяния. Дополнительным фактором, способствующим аккумуляции наносов в днище ложбины, является высокая трава. Поэтому днище, борта ложбины и необрабатываемые нижние части склонов являются ловушкой для материала, поступающего со склонов. Возраст наиболее старых деревьев – 30-35 лет, ещё в 1980-е годы ложбина активно использовалась для сенокоса и выпаса домашнего скота. Подобный режим использования днища и бортов ложбины способствовал развитию вторичного вреза – крупной промоины глубиной до 1 м, ныне заполненной наносами.

Смыв почвы в пределах Среднерусской возвышенности наблюдается при выпадении сильных ливней и в период снеготаяния. По данным Новосильской агролесомелиоративной опытной станции (30 км от исследуемого водосбора) в 1987-2021 гг. поверхностный сток при снеготаянии формировался 7 раз и до 1996 г. [Барabanов и др., 2018; Голосов и др., 2022].

© Голосов В.Н., Шамшурина Е.Н., Жидкин А.П., Колос Г.И., 2023

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00071).

Темпы эрозионно-аккумулятивных процессов рассчитаны для талого смыва по модели ГГИ в модификации Г.А. Ларионова и ливневого смыва по модели WaTEM/SEDEM. Для расчётов LS-фактора по эрозионной модели (ЭМ) использовалась цифровая модель рельефа, построенная по результатам съёмки БПЛА. Эродруемость почв (К-фактор) рассчитана по данным лабораторных анализов 45 образцов светло-серых почв, отобранных по площади водосбора. Эрозионный индекс дождевых осадков (R-фактор) равен 0,0335 МДж мм/м² ч год. Агроэрозионный индекс с/х культур составляет около 0,4, однако он мог сильно изменяться за агрикультурный период, в связи с чем в расчётах использовался C-фактор – от 0,3 до 0,5. Расчетные темпы эрозионно-аккумулятивных процессов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оценок перераспределения наносов (тонн/га в год) на пашне водосбора «Ломовец» различными методами

Процессы	Методы		
	почвенно-морфологический	эрозионное моделирование	радиоцезивный
Темпы перемещения наносов внутри пашни без учёта аккумуляции наносов	6,7-11,2*	9,1-14,7	
Темпы аккумуляции наносов на склонах (в том числе аккумуляция на границе пашни с нераспахиваемым дном ложбины)	6-11,1		
Темпы выноса наносов за пределы пашни	6-10,5*	3,1-3,6	
Темпы выноса наносов, установленные по объёму аккумуляции наносов в нераспахиваемой ложбине			3,0-4,3

* – с учетом самовосстановления почв

Для корректности сопоставлений расчётных по модели данных и полученных полевыми методами в качестве единицы измерения смыва принят показатель тонны в год.

Для оценки суммарных потерь почвы (включая водную и механическую эрозию, а также потери почвы при уборке корнеплодов) почвенно-морфологическим методом мощность горизонтов А+АВ была определена по катенам, охватывающим всю площадь водосбора. Общее число точек измерения мощности почвенных горизонтов – 45. Расчёты смыва с пашни проведены для 200-летнего интервала в связи с тем, что на плане Генерального межевания Дешкинского уезда 1785 г. участок показан нераспаханным, но именно на рубеже XVIII и XIX веков существенноросло сельское население в данном регионе.

На трехверстной карте 1861 г. весь водосбор показан как пашня. Эталонное значение горизонтов А+АВ принято равным 50 см.

Для определения объёма отложений наносов в днище ложбины использовался радиоцезиевый метод в сочетании с определением площади выделенных на основе различий в морфологии секторов ложбины. Различия в морфологии оценивались по уклону днища и конфигурации поперечных профилей через ложбину. Было выделено 4 сектора. Внутри каждого сектора в днище ложбины был заложен разрез, из передней стенки которого с площади 15×15 см послойно через 3 см были отобраны образцы почв для спектрометрического определения содержания ^{137}Cs . На поперечном профиле через ложбину в створе каждого разреза на разном удалении от него были пробурены скважины для определения суммарной мощности наносов, отложившихся в днище. На основании анализа эпюр вертикального распределения ^{137}Cs для каждого из 4-х разрезов была определена мощность отложений, накопившихся с 1986 г. (это – 90% отложений).

Согласно данным [Пацукевич и др., 1997], скорость самовосстановления серых лесных почв составляет 0,35 мм/год. Этот факт учитывался при расчетах смыва почвенно-морфологическим методом – без учета самовосстановления объёмы перемещённого материала составляют 270 т/год, с учетом – 449 т/год. Почвенно-морфологический метод учитывает перераспределение почвенного материала при развитии водной и механической эрозии, а также потери почвы за счёт выноса её с пашни при уборке корнеплодов, которые составляют 3-4 т/га в год. Расчёты по модели WaTEM/SEDEM учитывают влияние водной и механической эрозии, но не включают потери почвы при уборке корнеплодов. Поэтому они могут сопоставляться. Корнеплоды высеваются с 1960-х годов и не ежегодно. Но, учитывая потери почвы при их уборке можно говорить о завышении темпов смыва при расчёте по моделям. На самом деле это не так, поскольку, неизвестна продолжительность распашки участка, и возможно она несколько занижена. Только с середины XX века на полях региона стала использоваться техника для обработки почвы и уборки урожая. До этого вспашка проводилась при помощи лошадиной тяги. При расчётах по моделям приняты неизменные показатели эрозионного индекса осадков и запасов воды в снеге на период снеготаяния. Фактически же за последние 200 лет они варьировали.

Обращает на себя внимание низкие расчетные темпы аккумуляции на склонах на основе почвенно-морфологического метода. Это связано со сложностью выделения участков смыто-намытых серых лесных почв на обрабатываемых землях, т.к. содержание гумуса в них невысоко, а следы аккумулятивных отложений быстро исчезают из-за лёгкого механического состава.

Несмотря на условия, способствующие переотложению наносов внутри нераспахиваемой и частично залесённой и закустаренной ложбины, некоторая часть взвеси выносится со стоком за пределы водосбора. На это указывают эпюры вертикального распределения ^{137}Cs в почвенном профиле аккумулятивной толщи – черныбыльский пик нечёткий, растянут по площади отбора, имеет резкие перепады активности. С учётом этого можно говорить о высокой сходимости данных расчётов по выносу наносов за пределы пашни по моделям и по оценке аккумуляции наносов в днище ложбины. Следует учитывать, что съёмка с БПЛА и геоморфологическое обследование водосбора выявило формирование аккумулятивных зон на границе пашни и днища ложбины, где задерживается около 55 % (ЭМ) смытого материала.

Применение метода эрозионного моделирования для оценки темпов смыва даже при проведении подробной съёмки должно сочетаться с использованием независимых полевых методов, что позволяет определить степень достоверности расчётных темпов смыва и уточнить их пространственно-временные изменения.

Г.Б. Голубцов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ФОРМИРОВАНИЕ, МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА ОСТРОВОВ ШИРОКОПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ БОЛЬШИХ РЕК (НА ПРИМЕРЕ ОБИ И ЛЕНЫ)*

Речные острова при большом разнообразии их форм, размеров, условий образования слабо освещены в литературе по русловым процессам и морфологии речных русел. Анализ морфологии и морфометрии островов, как основных элементов разветвлений речных русел, их развития и гидролого-морфологических соотношений и связей с определяющими факторами русловых процессов позволяют получить представление о современном состоянии разветвлений и дать основу для прогнозных оценок переформирования русел, выявить общие закономерности формирования и развития островов и связанных с ними разветвлений, влияние на них местных условий, степени устойчивости русла и пр.

Верхняя Обь характеризуется направленным (от слияния Бии и Катунь и вниз по течению) возрастанием степени устойчивости. Более сложно распределение показателей устойчивости на средней и нижней Лене, где наблюдается чередование участков с большей или меньшей устойчивостью. Наибольшие значения показателей отмечаются в местах стеснения днища долины бортами, сложенными коренными трудноразмываемыми породами – Табагинским утесом, Кангаласским камнем, правым берегом между устьями Алдана и Вилуя. Этим участкам также соответствует увеличение крупности руслообразующих наносов.

Около половины от общей длины всех разветвлений на верхней Оби составляют параллельно-рукавные, примерно равные доли (10-14%) занимают односторонние и двусторонние, сложные одиночные и устьевые разветвления, еще 22% приходится на чередующиеся односторонние разветвления. Протяженный участок Лены (от г. Покровска до с. Жиганска) представлен разнообразными типами русла, включающими в основном русловые разветвления, доля которых с учетом разветвленно-извилистого русла составляет 94,5%. Оставшиеся 5,5% приходятся на относительно прямолинейное неразветвленное

© Голубцов Г.Б., 2023

* Выполнено по плану НИО (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00065).

русло, которое короткими вставками располагается в местах сужения дна долины.

В ходе гидролого-морфологического анализа получены зависимости для разветвлений разного типа, в частности морфометрических характеристик создающих их островов – длины L_0 и ширины B_0 от устойчивости русла (J и K_c). Показано, что с возрастанием устойчивости происходит упрощение морфологии разветвлений, сокращение количества рукавов, уменьшение степени разветвленности русла n_0/x .

Анализ линейных размеров, очертаний в плане, количества и положения островов в русле, а также выявленные особенности их динамики, позволили получить следующую последовательность стадий развития островов: *осерёдок (как основа формирования острова) → элементарный остров → малый остров → средний остров → большой остров → островной массив*. Последние являются конечной стадией в эволюционном ряду русловых (островных) разветвлений и в условиях прохождения руслоформирующих расходов при затопленной пойме могут создавать более сложные пойменно-русловые разветвления. Зависимость между показателями устойчивости русла и морфометрическими параметрами островов характерна для всех типов разветвлений и их структурных уровней – от зарастающих пионерной растительностью осерёдков до больших островов и крупных островных массивов.

Линейные размеры островов и их форма в плане зависят также от их положения в русле (в активной или периферической частях, образующих разветвления русла или разветвления 2-го порядка, в основных или второстепенных по водности рукавах). Параллельно-рукавным разветвлениям свойственно формирование элементарных и малых островов; в руслах других типов – их объединение и формирование средних и больших, а в зонах устойчивой аккумуляции наносов в периферийных частях русла и в условиях большей устойчивости – островных массивов. Степень устойчивости русла, его морфодинамический тип, стадии развития островов и их размеры определяют форму островов. Наименьшими значениями соотношения длины и ширины L_0/B_0 обладают большие острова в периферических частях русла, вне зоны активных переформирований. Каплевидные острова с оптимальным значением $L_0/B_0 = 3-4$, формируются в активных частях русла, имея сравнительно небольшие размеры. Разброс величин L_0/B_0 по длине реки отражает общую смену морфологической сложности русла, разнообразие его типов и стадий развития островов. Установлено, что при одинаковом морфодинамическом типе русла, несмотря на различия в линейных размерах, сохраняется характерный для данного типа русла коэффициент формы (исключение составляют элементарные острова на нижней Лене, отличаясь от аналогичных в среднем течении более вытянутой формой). Зависимости вида $L_0/B_0 = f(J, K_c)$ и $n_0/x = f$

(L , K_c) при введении поправочного коэффициента на размер реки и ее водность (при условии, что $b_r \sim Q$) имеют общий вид, различаясь по типам разветвления и разной устойчивости русла.

По мере усложнения структуры разветвлений возрастает разнообразие типов образующих их островов в направлении от относительно простых одиночных и односторонних к сложным сопряженным и параллельно-рукавным, часто осложненным разветвлениями 2-го порядка. Соотношение L_o/B_o изменяется при этом в зависимости от положения островов и их типа в направлении: островные массивы → большие острова в периферической части русла → большие острова в активной части русла → малые и средние острова в активной части русла → элементарные острова в основном русле → элементарные острова в разветвлениях 2-го порядка.

И.И. Григорьев, И.И. Рысин

Удмуртский государственный университет

ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИЗУЧЕНИИ ОВРАЖНОЙ И РУСЛОВОЙ ЭРОЗИИ*

Соотношение различных типов земель в общей структуре землепользования является одним из наиболее значимых факторов по степени воздействия на овражные и русловые процессы. В связи с незначительным количеством актуальных данных по динамике использования земель разных категорий в общей структуре землепользования интересующих нас участков и степени их влияния на развитие эрозионных процессов, достаточно важным является исследование дистанционных методов изучения в виде анализа разновременных космических снимков. По состоянию на 01.01.2022 в Российской Федерации из 379678,4 млн. га сельскохозяйственных земель 116,2 млн. га (30,6%) составляют пашни. Это наиболее подверженный водной эрозии тип сельскохозяйственных угодий. Изучение динамики структуры землепользования в разных природно-климатических и антропогенных условиях и влияния ее на развитие овражных и русловых эрозионных процессов на территории Удмуртской Республики является достаточно актуальным. Геоинформационные технологии и появление в свободном доступе космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения позволяют успешно решать эти задачи. Ранее на территории Удмуртии проводи-

© Григорьев И.И., Рысин И.И., 2023

*Выполнено при финансовой поддержке РФН (проект № 23-27-00194).

лись подобные исследования на основе дешифрирования аэрофото-съемки и изучения крупномасштабных карт. Однако проводились они или достаточно давно (80-е гг. 20 века) или касались ограниченных видов эрозионных процессов (техногенные и сельскохозяйственные овраги).

Первый опыт дешифрирования и картографирования овражной сети с использованием программы «SAS.Планета» и ГИС MapInfo в Удмуртии проводился на основе космоснимков 2015-2018 гг. Полученные карты густоты оврагов оказались схожими с прежними, составленными по материалам аэросъемки 1986-1990 гг. (коэффициент корреляции $r=0,74$), по плотности связь прослеживается меньше (коэффициент корреляции $r=0,60$). При этом наблюдается общая тенденция затухания процессов оврагообразования, за исключением ряда речных бассейнов в северной части республики. В дальнейшем созданная картографическая основа может быть использована для комплексной оценки природных и антропогенных факторов, влияющих на развитие эрозионных процессов. В настоящее время стоит задача актуализации количественных данных по изменению структуры землепользования во временном разрезе в течение последних 30-40 лет.

Для достижения поставленной цели нами применяется метод геоинформационного картографирования. Используются мультиспектральные космические снимки Landsat-5,7,8 и Sentinel-1,2, работа с которыми производится в программном комплексе QGIS 3.30. Разрешение данных снимков вполне достаточно для решения наших задач. Съемка проводится в нескольких каналах с подходящей периодичностью и сплошным охватом территории. Кроме того, имеется бесплатный доступ к архиву снимков (с 1984 г.). К ним применяются различные способы анализа и обработки спутниковых данных: визуальное и полуавтоматическое дешифрирование, синтез различных спектральных каналов. Данные исследования проводятся в сочетании с полевыми методами. Это визуальный контроль дешифровочных признаков на местности, крупномасштабная топографическая съемка и проведение самостоятельной аэрофотосъемки с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) отдельных эрозионных элементов и различных типов землепользования. Не вызывает сомнений тот факт, что для создания полноценной базы данных о структуре землепользования необходимо сочетание методов автоматизированного дешифрирования, ручной векторизации и полевого контроля. Это позволит получить максимально достоверный результат в исследованиях влияния разных типов землепользования на территории Удмуртии на развитие овражных и русловых процессов.

И.С. Дедова
*Волгоградский государственный
социально-педагогический университет*

**СОВРЕМЕННОЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ
ФЛЮВИАЛЬНО-ЭРОЗИОННОЙ СЕТИ
ХОПЕРСКО-БУЗУЛУКСКОЙ НИЗМЕННОСТИ
(ВОЛГОГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Хоперско-Бузулукская низменность является территорией со слабым проявлением овражной эрозии. Ее рельеф имеет пологоувалистый характер и представлен хорошо разработанной в послеледниковое время речной сетью и пологими склонами водоразделов Абсолютные отметки высот междуречий 100...170 м, отметки врезов балочных и речных систем – 69...106 м. Рассматриваемая территория сложена четвертичным комплексом осадков (валунные моренные суглинки, пески, глины) с незначительными показателями ДНС 0,7-1,3 м/с и монотонным строением литолого-стратиграфических комплексов. Здесь отмечаются крайне малые значения уклонов $0,18^{\circ}$ - $3,12^{\circ}$, которые при значительной ширине склонов в 1-5 км не способствуют активной денудации. Глубина вреза овражно-балочных систем небольшая и составляет 15-20 м [1]. Молодые овраги и промоины встречаются вблизи населенных пунктов и дорог, превалируют древние балочные системы и малые реки. Наиболее протяженными эрозионными системами являются: р. Перевозинка, б. Водяная, р. Черная, б. Березовая, р. Паника, б. Чесноковская. Все они относятся к водосбору р. Бузулук. Водосборы балок и малых рек поражены эрозией в разной степени. Средний показатель густоты эрозионного расчленения Хоперско-Бузулукской равнины составляет $0,2 \text{ км/км}^2$. Минимальные значения густоты варьируют в пределах $0,04$ - $0,06 \text{ км/км}^2$, максимальные – $0,6$ - $0,7 \text{ км/км}^2$. В развитии густоты эрозионных форм прослеживается связь с рельефом местности: как правило, эрозионные формы отсутствуют в пойме р. Бузулук, на плоских водоразделах, на горизонтальных площадках надпойменных террас. Преобладают значения густоты от $0,11$ до $0,25 \text{ км/км}^2$ (42% площади рассматриваемой территории) на слабо покатых склонах балочных систем. Показатели густоты от $0,26$ до $0,5 \text{ км/км}^2$ характерны для нижних частей склонов балок, имеющих большие показатели крутизны, для уступов надпойменных террас р. Бузулук, ряда населенных пунктов, что составляет около 28% от

территории равнины. Значения густоты от 0,51 до 0,7 км/км² прослежены в окрестностях крупных сельских поселений, там, где активно протекает сельскохозяйственная и дорожная эрозия.

Среднее значение плотности эрозионных форм в границах Хоперско-Бузулукской низменности 0,3 шт/км². минимальные значения плотности составляют 0,06 шт/км², максимальные – 0,8 шт/км². Около 23% территории имеют показатели плотности от 0,01 до 0,2 шт/км², это приводораздельные участки склонов крупных балок и рек, слабо покатые или ровные, а также ровные площадки надпойменных террас р. Бузулук. Около 49% территории имеют показатели плотности эрозионных форм 0,21-0,4 шт/км². Это нижние части склонов и днища балочных систем, где развиваются молодые овраги и промоины, а также окрестности населенных пунктов с ареалами сельскохозяйственной эрозии.

Около 16% площади – это эродированные территории с показателями плотности от 0,41 до 0,8 шт/км². К ним относятся распаханые склоны балочных систем, окрестности населенных пунктов, где проявляются очаги антропогенной эрозии.

Эрозионная сеть Хоперско-Бузулукской низменности в течение длительного времени активно использовалась человеком. Межбалочные водоразделы, покрытые плодородными почвами, распахивались, долины малых рек и эрозионных систем использовались как сенокосы и выпасы. В XX в. освоение природно-ресурсного потенциала, увеличение доли промышленного производства и строительства привели к ухудшению геоэкологического состояния основной части эрозионных водосборов и их антропогенному преобразованию. В настоящее время изменение природных параметров овражно-балочных водосборов и водосборов малых степных рек обусловлено:

1. активизацией плоскостного стока вследствие нерациональной эксплуатации почвенно-земельных ресурсов;
2. трансформацией твердого и ионного стока в руслах эрозионных систем за счет создания прудов и гидротехнических сооружений;
3. эксплуатацией подземных вод и, как следствие, изменением химических и санитарных параметров водоносных горизонтов, питающих малые реки и источники в балках;
4. преобразованием литогенной основы речных и балочных водосборов за счет эксплуатации месторождений полезных ископаемых и негативным воздействием различных отраслей промышленности и сельского хозяйства на их физические параметры.

В настоящее время в качестве мер защиты водосборов эрозионных систем выступают разные формы оптимизации природопользо-

вания. К ним относятся: проведение специальных агротехнических мероприятий на распахиваемых территориях; ремонт системы гидротехнических сооружений района с целью предотвращения их прорыва (например, пруд Звездковский); ликвидация свалок и стихийного накопления отходов в районе; соблюдение режима водоохраных зон малых и средних рек; слежение за химическими и бактериологическими параметрами подземных вод. Важную роль в сокращении темпов эрозионных процессов на пашне играют одно- и двухрядные кулисы из деревьев и кустарников, высаживаемые через 50—60 м одна от другой поперек склона. Лучшими породами для таких кулис являются смородина золотистая, ирга обыкновенная, ройбиния псевдоакация, лох узколистный, вяз перистоветвистый, акация белая и ясень зеленый.

И.Е. Егоров, И.В. Глейзер, И.И. Григорьев, А.Г. Казаков
Удмуртский государственный университет

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПРОЦЕССАМИ СУФФОЗИИ В ВОТКИНСКОМ РАЙОНЕ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

На территории Удмуртии проявления суффозии и связанные с ними формы рельефа распространены достаточно широко, однако они практически не изучены, и в литературных источниках почти не освещены. Пожалуй, единственным исключением является публикация о влиянии суффозионного процесса на устойчивость правого склона долины р. Камы, в которой отмечается, что наибольшее распространение суффозионные явления имеют в центральных районах Удмуртии, в бассейнах рек Кильмези и Валы, а также на левом берегу р. Камы. Здесь они развиваются, главным образом, в аллювиальных отложениях, слагающих надпойменные террасы. Что касается правого склона долины р. Камы, то здесь активность суффозии в целом не столь интенсивна, однако её проявление часто имеет крайне негативные последствия. В частности, именно с развитием суффозионного процесса связывается резкая активизация овражной эрозии к югу от с. Галаново в Каракулинском районе на участках нефтедобычи, а также развитие оползней в д. Докша, где формирование суффозионных подземных пустот явилось одной из причин, приведших к нарушению устойчивости склона.

Первые стационарные полевые наблюдения за процессами суффозии проводились нами с 2020 года на двух участках – в районе геоэкологической станции «Фертики» Удмуртского госуниверситета и на берегу Воткинского водохранилища.

В обоих случаях суффозия развивается в толще четвертичных суглинков. В Фертиковской балке оползнем вскрыты суглинки мощностью более 20 м, береговой уступ стационара на Воткинском водохранилище полностью сложен суглинками мощностью более 10 м. На Фертиковском стационаре в качестве объектов наблюдения выбраны четыре суффозионные просадки. Возле них закреплены грунтовые реперы, с которых один раз в год проводится планово-высотная тахеометрическая съёмка. На берегу Воткинского водохранилища выбраны три суффозионные образования, на которых наряду с ежегодной тахеометрической съёмкой проводится съёмка с БПЛА. Также объектом съёмки являются конуса выноса в устье суффозионных форм. Помимо съёмок обследуются прилегающие к стационарам территории с целью фиксации и учёта появления новых просадок или (для водохранилища) конусов выноса в зоне осушки.

На первом стационаре, в районе Фертиков, суффозионные просадки обнаружены возле правого склона балки. Они небольшие и все находятся на пологом коренном склоне, на небольшом удалении от бровки балки – не более 30 метров. Общее количество обнаруженных просадок, находящихся в разных стадиях развития – 12. К настоящему времени две из них полностью вскрыты и внешне напоминают небольшие глубокие овраги. К настоящим оврагам эти образования нельзя отнести по причине отсутствия не только следов поверхностного стока, но и самой возможности его проявления. Несколько просадок имеют глубину до 1,5 м, ширину от 2 до 4 метров, длину – от 8 до 10 м. Здесь просадки продолжают развиваться, но в настоящее время имеют небольшие скорости – несколько сантиметров в год. Возможно, причиной медленного развития просадочных явлений является зарастание территории лесом. Остальные суффозионные просадки напоминают неглубокие блюдцеобразные, но при этом хорошо выраженные в рельефе, понижения, диаметром от 1,5 до 5 м.

На Воткинском водохранилище, напротив, суффозия заметно активизировалась. Это связано, по-видимому, с увеличением высоты берегового уступа и связанным с ним ростом бортового отпора склона. Для суглинков характерна столбчатая отдельность, размеры трещин становятся больше, что усиливает сток по ним воды. У подножья склонов, сложенных суглинками, весной, при сбросе воды на водохра-

нилище, в створах суффозионных просадок образуются конуса выноса, сложенные песчано-глинистым материалом. Количество таких конусов заметно увеличилось.

На одном из суффозионных провалов весной 2021 году можно было наблюдать вскрывшийся на глубине 2,5 м суффозионный тоннель диаметром около 0,5 м, впоследствии заваленный просевшими породами. Эта форма увеличилась почти вдвое по сравнению с 2020 годом, как в длину, так и в ширину. Самая крупная суффозионная форма обнаружила достаточно высокую динамику, хотя и неравномерную от года к году. Две остальные изменились незначительно, просадки составили лишь первые сантиметры.

Активизация суффозионных процессов на водохранилище заставляет обратить на это более пристальное внимание. Что касается Фертиковского стационара, будет интересно наблюдать, в какой степени увеличение залесённости изменит скорость суффозионных процессов. Если под пологом леса суффозионные формы не образуются, то будут ли развиваться те, что образовались ранее.

О.П. Ермолаев, Е.А. Веденеева, К.В. Кулешова
Казанский (Приволжский) федеральный университет

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ФАКТОРА В ВОДНОМ СТОКЕ РЕК В ЛЕСОСТЕПНОЙ И СТЕПНОЙ ЗОНАХ ВОСТОКА ЕТР*

Водный сток рек – сложный и многофакторный процесс, зависящий от комплекса природно-антропогенных условий водосборов. В спектре антропогенных факторов играет значение сельскохозяйственная деятельность и создание искусственных водоемов – прудов. То есть, все виды хозяйственного воздействия, приводящие к изменению величин склонового стока. Пруды регулируют склоновый сток, но их вклад в изменение водного стока рек в зонах интенсивного земледелия не до конца понятен. Целью проведенных исследований являлась оценка роли одного из антропогенных факторов (малых искусственных водоемов – прудов) на формирование водного стока рек в лесостепных и степных ландшафтах востока Русской равнины. Для этого необходимо было картографировать все пруды в ключевых бассейнах.

© Ермолаев О.П., Веденеева Е.А., Кулешова К.В., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-17-00025)

Крупномасштабные топокарты, на которых отображены пруды, не всегда доступны для исследователей. Поэтому для картографирования прудов нами использованы данные дистанционного зондирования Земли высокого и сверхвысокого разрешения. Основным используемый слой – слой водосборов гидропостов. Геопространственная база данных по наблюдениям за стоком рек создана из разных источников: опубликованные материалы долгосрочных режимных наблюдений на гидрологических постах, автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) и другие. Для анализа выбрано 23 ключевых бассейна, обеспеченных наблюдениями за стоком на гидропостах. Наблюдения в исследуемых бассейнах велись с 1933 по 2019 гг. Территория исследования охватывает четыре субъекта РФ: Татарстан, Башкортостан, Самарскую и Оренбургскую области. Ключевые бассейны находятся в водосборах рек Волги и Камы. Площади бассейнов варьируются от 66 км² до 4746 км². Общий фон высот колеблется от 150 до 270 метров, средняя крутизна 1-3°, среднее годовое количество осадков 431 мм, гидротермического коэффициента – 0,79. Лесистость бассейнов в степной зоне около 7,5%, а в лесостепи – 13,8%. Луга занимают 33% площади. Распаханность, как правило, превышает 50%.

Малые водные объекты (пруды) на ДДЗЗ детектировались визуально по набору прямых и косвенных признаков. Не учитывались естественные водно-болотные комплексы (старичные озера) в поймах рек. В регионе исследования в ключевых бассейнах всего было картографировано 2252 пруда. Минимальная площадь пруда составляет 0.000084 км² (как правило, это копани), максимальная – 4,95 км², средняя – 0,035 км². Максимальный показатель общей площади прудов в бассейне – 15,14 км²; минимальный – 0,04 км²; средний – 3,19 км². Для оценки роли прудов на водный сток был использован удельный показатель – доля площади прудов в бассейне.

На первом этапе проведена оценка зависимости модуля водного стока рек от площади прудов. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о статистически достоверной связи между ними ($r = -0.49$). То есть, чем выше удельное значение площади прудов в бассейне, тем больше они перехватывают поверхностный склоновый сток и тем меньше водный сток реки. На втором этапе исследований для изучения условий формирования водного стока рек через поиск и интерпретацию взаимосвязей между стоком и спектром различных природных и антропогенных факторов показатель удельной площади прудов

дов в бассейне был также включен в состав анализируемых параметров, а вся совокупность исходного материала обобщена в многомерную выборку.

Математико-статистическая моделирование осуществлялось в среде R методами GLM и GAM (обобщенная линейная и аддитивная модели). Поскольку сильная мультиколлинеарность увеличивает погрешность оценки параметров, были проанализированы все переменные с помощью коэффициента инфляции дисперсии (VIF). В итоге получилась выборка параметров, которые не являются мультиколлинеарными: доля прудов, залуженность, среднее многолетнее максимумов температуры за год, средняя экспозиция склонов и длины линий тока в бассейне. Из них наиболее подходящей оказалась многопараметрическая GLM модель с такими предикторами, как доля прудов, залуженность и средние многолетние максимумы температуры за год в бассейне ($p\text{-value} = 0.009$ $R^2=0,45$). Для GAM модели подходящими предикторами был тот же набор показателей и сглаживающий параметр для предиктора залуженности ($R^2=0,52$).

Пруды перехватывают часть водного стока, который безвозвратно теряется для рек за счет расхода воды на бытовые и сельскохозяйственные нужды. Кроме того, в летнюю межень значительно увеличиваются потери воды на испарение с зеркала прудов и водохранилищ. Это является причиной сокращения водного стока рек. Модуль водного стока рек обратно пропорционален средним многолетним максимумам температуры за год. Связано это также с усилением потерь воды вследствие испарения. Этот процесс особенно ярко проявляет себя в степной зоне. Связь залуженности с водным стоком является прямо пропорциональной. Залуженность является комплексным параметром, который включает в себя множество характеристик. Например, – тип, проективное покрытие луговой растительности и почвообразующие породы. Преобладающий тип пород в бассейнах – глинистые и тяжелосуглинистые. Эти породы мало водопроницаемы, что приводит к уменьшению инфильтрации и увеличению доли поверхностного стока. Но луговая растительность перехватывает возникающий поверхностный сток. Именно поэтому коэффициент вклада в модель у этого параметра незначительный.

В.А. Иванов, С.Р. Чалов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ РЕК БАССЕЙНА ЛЕНЫ *

Интенсификация русловых деформаций в условиях деградации многолетней мерзлоты, а также сложная морфологическая структура русловых разветвлений среднего течения р. Лены и ее крупнейших притоков обуславливает актуальность внедрения новых технологий определения размывов дна и берегов. Такая задача была решена при помощи дешифровки космических снимков базы данных Global Surface Water Explorer (GSWE) [<https://global-surface-water.appspot.com/>]. Данный источник содержит сведения об изменении площадей водных объектов в период с 1984 по 2021 г. и позволяет в автоматическом режиме дешифровать размывы берегов. Методика была подвергнута валидации на примере размывов нижней и средней Оби в статье [Иванов, Чалов, 2021], где расчетные площади размывов по GSWE были сравнены с аналогичными данными ручной обработки снимков [Куракова, Чалов, 2019]. Погрешность составила 11%, что определяет возможность использовать GSWE как источник данных о русловых деформациях.

Размыв берегов был рассчитан для 1200 км течения р. Вилюй на участке от устья до нижнего Вилюйского водохранилища, для 300 км нижнего течения р. Тюнг и 800 км р. Марха (оба – притоки р. Вилюй). Для р. Алдан было проанализировано 1100 км нижнего течения участка от слияния с Леной до впадения р. Учур, для р. Амги – основного притока р. Алдана – на протяжении 500 км.

В данном исследовании впервые в бассейновом масштабе были получены оценки деформаций берегов. Суммарно за период с 1984 по 2021 г. на участке речной сети длиной 3600 км было размывто 13400 км² берега. Среди всех исследованных водотоков максимальная интенсивность переформирования характерна за исследуемый период для р. Алдан на участке 300-400 км от устья, 1.08 км²/год на 100 км, при среднегодовом расходе воды в 5000 м³/с; и р. Вилюй на участке 100-200 км от устья, 1.1 км²/год на 100 км, при среднегодовом расходе воды 1670 м³/с. Коэффициент корреляции между среднегодовым рас-

© Иванов В.А., Чалов С.Р., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 21-17-00181 «Интегральная оценка баланса наносов речной системы р. Лена»

ходом воды и площадью размыва берегов составляет 0.53, что свидетельствует о ведущей роли размера рек в выраженности интенсивности размывов. Коэффициент корреляции статистически значимый, при выборке в 38 значений.

Далее даны характеристики интенсивности русловых деформаций для отдельных речных систем.

На р. Вилное отрезок с наиболее неустойчивым руслом расположен ниже впадения р. Марха. С 1984 по 2021 г. площади размыва на данном участке имели значения в диапазоне от 600 до 1200 км² на 100 км, в тоже время выше по течению данный параметр на порядок меньше и лежит в диапазоне от 10 до 200 км². Ниже впадения р. Тюнг Виллой имеет широкую пойму и массовые русловые разветвления, а также участки свободного модерирования.

За 34 года по данным GSWE р. Марха имеет сопоставимые с нижним Вилуем скорости многолетнего размыва, от 40 до 400 км², несмотря на существенно меньшие (в несколько раз) расходы воды. Это может быть связано с разными аспектами влияния Виллойского водохранилища на сток наносов, взаимодействие между собой вертикальных и плановых русловых деформаций. В низовьях Тюнга скорости эрозии не превысили 100 км² на 100 км, что можно объяснить меньшей водностью этой реки, в сравнении с Мархой.

Река Алдан имеет сопоставимые с Вилуем и Мархой по своей величине скорости эрозии берегов. Особенно площади размыва увеличиваются ниже слияния Алдана и Амги – с 190-730 км² до 460-1260 км² на 100 км. На р. Амге значения эрозии берегов практически равномерно распределены по длине реки и составляют 200-280 км²/год на 100 км. Для р. Алдан средние значения размывов берегов в период с 1984 по 2016 составили 557 км² (15 км²/год/100км), для Амги – 237 км² (6 км²/год/100км). Наиболее активными для Алдана являются перекатные участки при слиянии с Леной (19 км²/год/100 км), участок слияния с Амгой 1257 км² (34 км²/год/100км), перекатный участок близ слияния с р. Томпо 728 км² (20 км²/год/100км), что обусловлено русловыми процессами в русловых разветвлениях, увеличением водности.

Совокупно для нижнего течения р. Алдан с 1984 по 2021 год было размывто 6127 км² (167 км²/год) берегов, при устьевом значении среднегодового расхода в 5170 м³/с. Для нижнего течения р. Виллой аналогичные показатели составляют 4106 км² (111 км²/год) при втрое меньшем расходе – 1682 м³/с. Это связано с тем, что в отличие от Алдана, Виллой почти на всем протяжении имеет свободно меандрирующее русло, когда Алдан имеет обширные участки врезанного русла.

**В.А. Иванов¹, М. Habel², С.Р. Чалов¹, В.А. Ефимов¹,
D. Cieplowski³, B. Koffi⁴**

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

²Institute of Geography, University of Kazimierz Wielkiego Bydgoszcz,

Poland, ³The Chief Inspectorate of Environmental Protection, Warsaw,

Poland, ⁴UFR Environment, Université Jean Lorougnon Guédé, Côte d'Ivoire

ВЛИЯНИЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА МОРФОЛОГИЮ РУСЛА КРУПНЫХ РЕК: «ЯМЫ» В РУСЛЕ РЕКИ КОЛЫМЫ

Увеличение стока воды и наносов в Арктике оказывает значительное влияние на современную морфологию русел арктических рек. В данном исследовании предполагается рассмотреть, какую роль сток донных наносов играет в русловом процессе нижнего течения р. Колыма. Для решения данной задачи были проведены разновременные батиметрические съемки на реке Колыма в 2020-2021 гг., а именно на 20 км участке около г.п. Черский, а также на 10 км участке близ памятника природы «Дуваный яр». По данным этих измерений были построены батиметрические карты. Данные карты были дополнены информацией о высотах берегов и рельефе островов при помощи цифровой модели рельефа Arctic DEM, что позволило производить гидродинамические расчеты при затоплении берегов. Так, на обоих участках были выявлены замкнутые специфические русловые формы, «ямы», где батиметрические отметки русла достигают 25-27 м, а также данные формы рельефа сопряжены с крутыми склонами с наклоном от 50° до 85°.

Для участка Дуваный яр была обнаружена одна «яма», ее морфометрические пропорции следующие: переуглубление (разница между фоновыми значениями глубины около объекта с максимальной глубиной в «яме») составляет 3 метра, плановые размеры 150 x 200 м, данный объект расположен близ побочня у правого берега. Для участка около Черского предположительно существует 5 «ям». Первая расположена на излучине маловодного рукава, ее переуглубление составляет 13 м, а размер 500 x 250 м, вытянута по ходу русла. Вторая яма расположена в месте слияния двух рукавов, одиночного разветвления её параметры 1800 x 200 м, 12 м соответственно. Серия из трех «ям» также расположена на стрелке основного рукава р. Колыма, их глубина лежит в диа-

пазоне от 5 до 15 м, они также вытянуты по течению реки, при ширине в 150-300 м, они имеют протяженность от 1500 до 3000 м.

Происхождение данных «ям» на текущий период остается не ясным, в том числе из-за того, что описание подобных объектов практически полностью отсутствует в литературе, за исключением похожих объектов на р. Анадырь [Школьный и др.] и р. Маккензи [Beltaos et al.]. На данный момент существует несколько предположений о генезисе «ям», среди которых могут быть выделены как сугубо гидродинамические причины, как, например, сужение потока вследствие ледовых процессов, так и причины, связанные с русловыми процессами, специфические геологические условия или криогенные процессы [Школьный и др.].

Для проверки гидродинамической гипотезы формирования «ям», используя полевые данные и батиметрические карты, авторами была, откалибрована и валидирована 2D-гидродинамическая модель с высоким разрешением до 1 м в программном комплексе MIKE 21 C, который позволил рассчитать распределение скоростей потока, расходы влекомых и взвешенных наносов, а также русловые деформации. Были рассмотрены несколько сценариев моделирования с использованием реального гидрографа и экстремальных расходов воды для выявления особенностей поведения русловых «ям», их заносимости, а также механизма их формирования.

М.А. Иванов, В.А. Рядно, Н.С. Кузякова
Казанский (Приволжский) федеральный университет

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ Р. ТОБЕ-ЧОКРАК ПО ДАННЫМ LANDSAT*

Структура земель является одним из ключевых факторов, учитываемых при моделировании эрозионных процессов. Настоящее исследование продолжает серию работ по оценке динамики землепользования в отдельных речных бассейнах. Общая площадь бассейна р. Тобе-Чокрак составляет 30757 га. Анализ проводился для 4 временных периодов: 1) «поздний СССР» – конец 1980-х гг.; 2) период после распа-

© Иванов М.А., Рядно В.А., Кузякова Н.С., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00025)

да СССР – середина 1990-х гг.; 3) начало 2000-х гг.; 4) современный период.

Для анализа структуры земель были использованы безоблачные разносезонные снимки Landsat (Collection 2, Level-2 Data Products) за беснежный период из открытого архива Геологической службы США (U.S. Geological Survey – USGS). Использование разносезонных снимков необходимо для учета фенологических особенностей различных типов землепользования / земного покрова (в первую очередь различных типов растительности). Для достоверного отличия используемых пахотных земель от заброшенных зарастающих полей и от естественной травянистой растительности необходимы данные за несколько соседних лет (4-5 лет в нашем случае). Всего было подобрано 20 снимков Landsat 5 TM за 1984-1987 гг., 15 снимков Landsat 5 TM за 1994-1997 гг., 21 снимок Landsat 7 ETM+ за 1999-2003 гг. и 16 снимков Landsat 8 и 9 OLI за 2019-2022 гг.. Для каждого периода были собраны многоканальные изображения (композиции). В композиции вошли отдельные каналы (1-5 и 7 каналы для Landsat 5 и 7; 2-7 каналы для Landsat 8 и 9), построенные индексы NDVI по каждому снимку и рассчитанные по NDVI статистические метрики, а именно: среднее, сумма, максимум, медиана, среднеквадратическое отклонение.

Первоначально для каждого рассматриваемого периода были подготовлены обучающие выборки для распознаваемых классов земель: 1. Используемые пахотные земли; 2. Луга; 3. Леса; 4. Водоемы; 5. Антропогенные объекты; 6. Виноградники; 7. Солнечные электростанции (фермы). Эталонные участки выбирались по разносезонным синтезированным изображениям (каналы 5-4-3 для Landsat 5 и 7, и 6-5-4 для Landsat 8 и 9). Контроль при наборе эталонов осуществлялся по снимкам высокого разрешения, представленным в Google Earth для 3-го и 4-го периодов, и по снимкам Key Hole для 1-го периода. К сожалению, опорных данных для периода 1994-1997 гг. найдено не было. Следует отметить несколько моментов. К классу «Луга» были отнесены: гигрофитная травянистая растительность в поймах рек и водоемов; мезо- и ксерофитные травы на склонах долин и водоразделах; а также зарастающие заброшенные пашни. Солнечные электростанции появились недавно и присутствуют только на снимках за современный период.

Классификация проводилась в модуле EnMAPBox для QGIS алгоритмом Random Forest с количеством деревьев равным 100. При этом 80% эталонных пикселей использовалось для классификации, а 20% – для оценки точности распознавания.

По результатам распознавания были составлены соответствующие карты, рассчитаны площади основных типов землепользования и земного покрова за рассматриваемые периоды и их доли от общей площади бассейна. Также были оценены изменения, произошедшие по сравнению с периодом позднего СССР (1984-1987 гг.). Анализируя полученные результаты, можно выделить основные особенности в структуре и динамике земель на рассматриваемой территории. Доминирующую площадь во все рассмотренные периоды занимают пахотные земли и луговая растительность. Суммарно на их долю приходится 90 % и более от общей площади. Однако выявлено значительное сокращение пахотных земель (на 43,7%) за счет их забрасывания и дальнейшего зарастания травянистой растительностью.

Анализ динамики других типов землепользования и земного покрова несколько затруднителен, ввиду их незначительных площадей. В какой-то степени наблюдаемые изменения обусловлены погрешностью распознавания. Это хорошо прослеживается на примере антропогенных объектов, где наблюдается несущественное, но тем не менее нелогичное сокращение их площади во втором и третьем рассматриваемых периодах. Однако по состоянию на современный период их площадь выросла почти втрое по сравнению с первым периодом.

Можно выделить некоторые характерные и объяснимые тенденции и для других классов. Площадь виноградников в целом сокращается, при этом наблюдается смена их местоположения. По снимкам можно увидеть, что виноградники не просто забрасывались, но и вырубались, а в дальнейшем распахивались или зарастали травянистой растительностью. В первую очередь это связано с их уничтожением в соответствии с указом М.С. Горбачева от 16 мая 1985 г. «Об усилении борьбы с пьянством». По официальным данным, в Крыму было уничтожено до 30% виноградных плантаций. В современный период появились новые площади, занятые виноградниками. Динамика площади водных объектов в первую очередь связана с функционированием Межгорного водохранилища. Его строительство завершилось только в 1991 г., а начиная с 2015 г. начались проблемы с его заполнением вследствие засух, что подтверждается «Докладами о состоянии окружающей среды» и данными модели Global Surface Water Explorer.

М.М. Иванов^{1,2}

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

²*Институт географии РАН*

МЕТОДИКА ДЕТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВНУТРИБАСЕЙНОВОЙ АККУМУЛЯЦИИ НАНОСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЦЕЗИЕВОГО МЕТОДА *

Балансовый подход при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов в масштабах речных бассейнов является одним из базовых. Малое количество или полное отсутствие мониторинговых данных приводит к тому, что данный подход зачастую является единственным способом оценить объёмы и определить источники потоков наносов в речных бассейнах с высокой антропогенной нагрузкой. При геоморфологической разобщённости (geomorphic disconnectivity) бассейнов равнинных рек детальность оценки баланса наносов становится затруднительной. Отдельные части баланса наносов представляют собой «белые пятна», чья оценка производится либо на основе фрагментарных фактических данных, либо производится аналитически на основе обобщения опыта предшествующих эмпирических наблюдений или по остаточному принципу в рамках единого баланса вещества.

Характерными примерами могут послужить аккумуляция наносов в зонах перехода от обрабатываемых склонов междуречный к задернованным бортам сухих долин и долин рек и от бортов сухих долин к их днищам. Также требует улучшения качества оценка размеров аккумуляции внутри сухих, являющих одним из основных накопителей наносов. Зачастую оценка интенсивности аккумуляции основывается на точечных данных, репрезентативность которых может быть поставлена под вопрос в силу высокой пространственной неоднородности проявления эрозионно-аккумулятивных процессов. Решение данной проблемы требует разработки и применения оптимизированной комплексной схемы проведения полевых наблюдений, которая с одной стороны позволит получать необходимые объёмы данных, а с другой будет технически реализуемой в условиях ограниченности материальных ресурсов и времени.

© Иванов М.М., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект 23-77-10045) и по плану НИР (госзадание) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М. В. Ломоносова (№121051100166-4 – полевые исследования).

Датирование отложений с помощью техногенного ^{137}Cs зарекомендовало себя как высоко продуктивный метод интенсивности аккумуляции за период после выпадения радионуклидов на дневную поверхность. Его одномоментное поступление на поверхность почвы позволяет точно определять темпы аккумуляции с 1986 г. Продолжительность пост-Чернобыльского периода во многом совпадает с временными рамками оценки современной климатической нормы (1991–2020 гг.). Следовательно, наблюдаемые в течение этого времени тенденции развития эрозионно-аккумулятивных процессов могут рассматриваться в качестве ответа природной среды на трансформацию климата. Тем не менее, необходимо учитывать и существенные изменения площадей пашни и систем землепользования в бассейнах рек Восточно-Европейской равнины, обусловленных экономическим кризисом начала 1990-х годов.

На протяжении пост-Чернобыльского периода на территории Европейской территории России был накоплен богатый опыт проведения эрозионных исследований с использованием радиоцезиевого метода, в том числе в районах с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. С момента начала исследований некоторых из них уже успело пройти несколько десятилетий. Проведение повторных исследований на ключевых участках различных звеньев флювиальной сети позволяет выявить тенденции развития эрозионно-аккумулятивных процессов в меняющихся климатических условиях и трансформации системы землепользования.

В условиях интенсивного радиоактивного загрязнения сравнительно большое количество проб может быть обработано в силу малого времени необходимого для надёжного определения активности ^{137}Cs . Вместе с этим высокие концентрации ^{137}Cs в почве позволяют применять компактные гамма-детекторы со сравнительно низкой чувствительностью непосредственно в поле. Это даёт возможность выстраивать площадную картину распределения мощности аккумулярованного слоя и параллельно оценивать репрезентативность имеющихся точечных результатов. Однако корректное применение такого рода экспресс-анализ может быть осуществлено только при условии заранее определённой формы вертикального распределения радионуклидов в исследуемой толще наносов и в совокупности с классической схемой отбора почвенного материала.

Н.Н. Иванова¹, Д.В. Фомичева²

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

²*Почвенный институт им. В.В. Докучаева*

К ВОПРОСУ О ВОЗРАСТЕ АГРОГЕННЫХ ВАЛОВ-НАПАШЕЙ НА БОРТАХ МАЛЫХ ДОЛИН СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ) *

Распашка приводит к активизации процессов эрозии почв. Одним из проявлений их деятельности является формирование антропогенных микро- и наноформ рельефа с различной длительностью существования, которые, в свою очередь, начинают влиять на характер протекания и интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов. Мало изученными до настоящего времени, несмотря на широкое распространение, являются напашы – своеобразные формы агрогенного микрорельефа в виде валов, оконтуривающих нижнюю границу пашни на склоне. После механизации сельскохозяйственных работ рост напашей происходил вследствие одновременного воздействия двух факторов: механического наваливания почвы при вспашке с оборотом пласта и аккумуляции поступающих с вышележащего склона наносов. Однако в самом начале массового сельскохозяйственного освоения, которое на юге современной Тульской области началось не ранее середины XVII в., причиной их формирования было, вероятнее всего, различие в шероховатости поверхности пашни и нижележащих участков с естественной травянистой растительностью, которое обуславливало аккумуляцию смытого материала вдоль линейной границы распаханного и задернованного склона. На протяжении нескольких столетий, вплоть до конца XIX в., глубина вспашки составляла 10-12 см и проводилась практически без оборота пласта. Поэтому механическое перемещение почвенной массы сельскохозяйственными орудиями вряд ли могло играть существенную роль.

Формирование и рост напашы существенно изменяет схему перемещения наносов на склоновом распаханном водосборе. В зависимости от расположения нижней границы пашни относительно уклона склона вал напашы может служить рубежом аккумуляции поступающих с поля продуктов эрозии или концентрировать поток наносов и отводить его вдоль по уклону, часто даже за пределы водосбора. Кроме того, вал напашы сам по себе является аккумулятивным телом, и объемы депонированного здесь материала необходимо учитывать при

© Иванова Н.Н., Фомичева Д.В., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-27-00170)

балансовых исследованиях. Например, в типичном для центральной Европы агроландшафте с тысячелетней историей возделывания на юге Германии за 150 лет в напашах было переотложено около 1,1% от общего объема внутрибассейновой аккумуляции [Houben, 2008]. Детальные почвенно-морфологические исследования на одном из малых водосборов в северо-западной части Среднерусской возвышенности показали, что объем материала вала-напаша, начавшего формироваться 30-35 лет назад в связи с изменением контуровки полей, к настоящему времени составляет около 2% от всего объема внутрибассейновой аккумуляции [Кошовский и др., 2019].

Время существования напаша, как элемента микрорельефа, определяется длительностью сохранения неизменными границ угодий. При расширении полей напаша оказываются внутри пахотных участков, планируются сельскохозяйственной техникой и перестают существовать как положительные формы рельефа. На залежных участках валы напашей сохраняются в течении длительного времени. В Западной Европе нет проблем с определением их возраста, так как изменения границ полей картографически задокументированы с начала XIX в. Способ отображения обстановки на отечественных картах XVIII-XIX вв. (планы Генерального межевания и Военно-топографическая карта) не дает возможности определить точное местоположение границ угодий в пределах склонов эрозионных форм. Наличие валов «старых» напашей на задернованных в настоящее время бортах малых долин в Тульской области отмечали многие исследователи [Козлов, 1953; Александровский, 1996 и др.]. По умолчанию считалось, что «старые» напаша маркируют нижние границы полей предыдущих этапов освоения, но вопрос о том, когда именно началась и закончилась распадка этих участков, остается открытым. Существуют только предположения, опирающиеся на косвенные факты, что пашня «спустилась» на борта долин после реформы 1861 г. Этот вывод можно сделать, например, при анализе изменения структуры угодий в XIX в. (резкое сокращение площади неудобий в период между 1861 и 1870 гг. в Тульской губернии). Также во время полевых обследований бассейнов рек Европейской России на рубеже XIX-XX вв. сотрудниками экспедиции Тилло отмечалось, что крестьяне повсеместно распахивают борта малых долин и балок.

Анализ спутниковых снимков и планов внутрихозяйственного землеустройства для одного из малых водосборов в бассейне р. Локны (Плавский район Тульской области) показал, что верхние части бортов балки и принимающей долины распахивались вплоть до середины 1980-х гг., когда нижняя граница пашни была передвинута на линию

бровки балки, где и располагается до настоящего времени. В процессе детальных исследований перераспределения наносов в пределах водосбора было проведено сравнение скорости эрозии, полученной разными методами, в том числе почвенно-морфологическим (ПММ) и моделированием [Zhidkin et al., 2023]. Если принять за начало освоения бортов балки середину 1860-х гг., то длительность распахки этих участков составит около 120 лет. В этом случае расчетные среднегодовые потери почвы показывают хорошую сходимость с результатами, полученными путем оценки современной мощности почвенных горизонтов (ПММ), что является существенным аргументом в пользу предположения о том, что распахка бортов малых долин была следствием крестьянской реформы 1861 г.

Н.Е. Зарецкая, А.В. Панин, Д.В. Баранов

Институт географии РАН

ВЫЧЕГОДСКО-КАМСКИЙ «ГИДРОУЗЕЛ» И ФОРМИРОВАНИЕ ЮЖНОГО РЕВЕРСИВНОГО СТОКА В СРЕДНЕМ И ПОЗДНЕМ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ*

Территория водораздела бассейнов рек Камы и Вычегды изучается уже больше 80 лет, начиная с конца 1930-х годов, когда там проводилось широкомасштабное геологическое изучение территории, включая глубокое бурение, в связи с первым проектом переброски стока северных рек на юг [Краснов, 1948]. Уже тогда в обобщающей работе Краснова была приведена реконструкция реверсивного стока Вычегды, как во время последнего, так и во время среднеледникового оледенений, и формирования озёр в Вычегдской и Верхне-Камской впадинах. Позднее эти реконструкции перерабатывались и дополнялись многочисленными исследователями без получения новых геологических данных, и касались только последнего ледникового цикла. Основная концепция, развивавшаяся в этих работах, «продвигала» границу последнего Скандинавского оледенения далеко на восток по долинам рек Северной Двины, Вычегды и Ваги. В результате, происходило блокирование северо-западного стока, формирование подпрудных озёр и перелив их через порог стока 135 м через Кельтминский спиллвей в бассейн Камы [Квасов, 1975; Лавров, Потапенко, 2005; Lysa et al., 2014; Larsen et al., 2014; Назаров и др., 2015 и др.]. Однако

© Зарецкая Н.Е., Панин А.В., Баранов Д.В., 2023

* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00259)

исследованиями последних лет эта концепция была опровергнута [Panin et al., 2020; Zaretskaya et al., 2020; Zaretskaya et al., in press]. В результате уточнения юго-восточной границы последнего оледенения и её сдвига к северо-западу, а также с помощью новых геологических и геохронометрических данных было установлено, что во время максимума последнего оледенения северный и северо-западный сток рек не блокировался, подпрудные озёра имели локальное внутриводораздельное распространение и реверсивный сток на юг через Вычегодско-Камский водораздел не осуществлялся.

Тем не менее, на космических снимках хорошо видны береговые линии существовавших когда-то приледниковых озёр, а также хорошо выраженные в рельефе «брошенные» широкие долины и озёрные котловины, что позволяет предполагать существование реверсивного стока во время более древних ледниковых периодов. Бурение, проведённое в Кельтменском спиллвее в 2017 году и последующие аналитические и геохронометрические исследования полученного керна показали, что в период 170-140 т.л.н. эта территория была занята озером [Panin et al., 2020], сток которого, по-видимому, осуществлялся в бассейн Камы и далее на юг и, возможно, являлся существенной составляющей позднехазарской трансгрессии Каспия. Палеогеографические исследования, проведённые нами в Вычегодской впадине в 2020 и 2022 годах, показали существование обширного приледникового водоёма, осадки которого представлены мощными ленточными глинами. Водоём формировался во время вычегодского (московского, МИС 6) оледенения, которое блокировало сток Вычегды на северо-запад и вызывало реверсивный сток в бассейн Камы.

Таким образом, наши исследования показали, что переток воды из бассейна Вычегды в бассейн Камы последний раз имел место в среднем неоплейстоцене. Во время последнего (позднечетвертичного) Скандинавского оледенения северо-западный сток не блокировался, и бассейны Вычегды и Камы не соединялись.

В.В. Занозин, А.Н. Бармин, Вик. В. Занозин

Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева»

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ И ПЛОЩАДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЕОСИСТЕМ СЕВЕРНОГО ПОДРАЙОНА ЛАНДШАФТА ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ*

Формирование ландшафта дельты реки Волга началось около 2,5–3 тысяч лет назад, т.е. с начала субатлантической эпохи голоцена, когда стали формироваться современные ландшафты в бассейне Каспия, а, следовательно, и современные и близкие к ним параметров водного баланса. До этого здесь уже отмечался рельеф бэровских бугров [Рычагов, 1997]. Выделяемый в настоящее время северный подрайон ландшафта дельты Волги в геоморфологическом отношении является переходным от Волго-Ахтубинской поймы к дельте Волги. Его формирование связано с преобладающей ролью боковой миграции русел водотоков и разливов полых вод [Николаев, 1962]. Здесь полностью отсутствуют урочища бэровских бугров, которые были размыты мощными древними водотоками. Нет здесь и геосистем морского генезиса – култучноравнинные урочища или урочища, сформировавшиеся на основе морских островов.

В морфологической структуре северного подрайона ландшафта дельты Волги преобладает группа русловых урочищ, сформированных многочисленными водотоками. Флювиальный генезис распространенных геосистем подтверждается литологическими особенностями и конфигурацией – длина урочищ часто превышает ширину. Характер поверхности данных природных комплексов меняется от плоского и пологовогнутого до гривистого. В последнем случае в ходе смещения крупных русел происходило формирование вытянутых валобразных повышений – грив высотой до 1,5-2 м при ширине до нескольких десятков метров. Более мелкие водотоки, часто мигрирующие, придавали поверхности мелкогривистый характер. Мелкогривистый рельеф часто

© Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин Вик. В., 2023

* Выполнено по плану НИР Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева в рамках проектов «Анализ геодинамических и геоморфологических преобразований Прикаспийской низменности радиолокационными методами наземного и космического типа (на примере дельты Волги)» и «Проектирование электронного репозитория о геосистемах дельты Волги» и внутривузовских исследований (2022 г.) по Стратегическому проекту №4 «Повышение уровня экологической безопасности и сохранение природных систем региона» ФГБОУ ВО «АГУ им. В.Н. Татищева» в рамках проекта «ПРИОРИТЕТ 2030» – Программы развития Астраханского государственного университета до 2030 года.

возникал также в ходе заполнения полыми отложениями высыхающих русел, русловых и руслово-ильменных впадин, понижений между вышедшими из зоны действия русловых потоков речных кос, осередков и т.п. Положение рассматриваемых урочищ относительно меженного уровня воды в водотоках позволяет в большинстве случаев разделить их на три уровня: низкий, средний и высокий, что сказывается на внешнем облике формирующихся геосистем. Площадные показатели природных территориальных комплексов (ПТК) ранга урочище северного подрайона ландшафта дельты Волги представлены в таблице 1.

Таблица 1. Площади ПТК урочищ северного подрайона ландшафта дельты Волги

	Наименование группы ПТК	Площадь, км ²
1	Русловые урочища среднего уровня, пологоволнистые	106,6
2	Русловые урочища высокого уровня, пологоволнистые	31,77
3	Русловые урочища низкого уровня, пологоволнистые	78,88
4	Русловые урочища среднего уровня, гривистые	43,10
5	Русловые урочища низкого уровня, гривистые	30,12
6	Русловые урочища высокого уровня, гривистые	39,21
7	Русловые урочища высокого уровня, плоские	1,01
8	Русловые урочища среднего уровня, плоские	7,47
9	Русловые урочища низкого уровня, плоские	102,783
10	Мелкогривистые русловые урочища низкого уровня	124,312
11	Мелкогривистые русловые урочища среднего уровня	65,709
12	Мелкогривистые русловые урочища высокого уровня	42,42
13	Русловые урочища низкого уровня, пологовогнутые	46,721
14	Прирусловые валы	2
ИТОГО по ПТК		722,105

В морфологической структуре северного подрайона ландшафта дельты реки Волга преобладают русловые пологоволнистые и мелкогривистые урочища, суммарная площадь которых составляет более 60 % от всей площади региона. Среди пологоволнистых наибольшие площади занимают урочища среднего уровня, а мелкогривистых – низкого. По 15 % от площади северного подрайона занимают гривистые и плоские русловые урочища. В группе гривистых урочищ преобладают геосистемы среднего уровня, в плоских – низкого. Остальную

часть северной дельты занимают пологовогнутые русловые урочища низкого уровня и прирусловые валы.

Особенности пространственного размещения геосистем северного подрайона ландшафта дельты были выявлены в ходе анализа соответствующей картосхемы. Русловые гривистые урочища в основном расположены вдоль русла Волги и других крупных водотоков. Мелкогривистые урочища высокого и среднего уровня в основном сформировались в южной половине подрайона, низкого отмечаются по всей его территории. Плоские русловые урочища сосредоточены в южной части региона, пологоволнистые – в северной. В целом для северного подрайона ландшафта дельты характерно хаотичное размещение основных групп геосистем ранга урочище, что свидетельствует о сложном процессе формирования его морфологической структуры.

В.К. Калюжный

Администрация «Камводпуть»

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛОВОГО РЕЖИМА ЗОНЫ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В публикации [Калюжный, 1998] были уточнены границы зоны выклинивания подпора Камского водохранилища и ее основных участков и проанализированы особенности ее руслового режима: трансгрессивная и регрессивная аккумуляция наносов; увеличение амплитуды глубин; увеличение размеров русловых форм; увеличение искривлений русла; размыв второстепенных рукавов; уменьшение устойчивости русла. Было показано, что после прекращения с 1994 г. дноуглубительных и выправительных работ, способствовавших стабилизации русла, по мере его релаксации направленность и скорость изменения руслового режима заметно возрастают.

Наиболее интересным для научных и практических целей является верхний участок зоны выклинивания подпора протяженностью 72 км от Боровской воложки до 46 км р. Вишеры, соответствующий диапазону наполнения выше отметки минимального навигационного уровня водохранилища 106,0 м.

Дополнительным анализом изменения положения кривой свободной поверхности воды при отметке НПУ 108,5 м и меженных уровнях

на р. Вишере было обнаружено, что вследствие образования «тела заиления» на 16-42 км от устья верхняя граница зоны выклинивания подпора поднялась на 4-5 км до 46 км при верхней границе водохранилища, находящейся на 26 км от устья. Анализ материалов современных русловых съемок и спутниковых снимков обнаружил тенденцию ускорения размыва пойменных и побочневых протоков с образованием новых островов.

На спутниковом снимке 1985 г. спрямляющая Редикорскую излучину протока (34-40 км р. Вишеры), почти не прослеживалась. Рост левобережных побочней перекатов, расположенных в верхнем и нижнем крыльях излучины, ограничивался ежегодным дноуглублением (рис. 1). Прекращение с 1994 г. дноуглубительных работ привело к быстрому росту верхнего левобережного побочня, отклонению динамической оси потока к верхней части формирующейся спрямляющей протоки и ее интенсивному развитию. На спутниковом снимке 2020 г. (рис. 1) побочень практически перекрывает старое русло, ширина протоки увеличилась до 100 м при меженной глубине до 4 м, а вынос из протоки продуктов размыва частично перекрыл судовой ход на Нижнередикорском перекате, уменьшив ширину меженного русла от 130 до 40 м. С навигации 2018 г. развитие излучины полностью прекратилось. Более того, отмечается начало развития левобережной пойменной протоки с выносом продуктов размыва в район вершины излучины.



Рис. 1. Редикорская излучина 2020 год

Сопоставление материалов лоцманских карт издания 1954 и 2018 гг. на участке р. Кама от устья Вишеры до о. Тюлькинский (рис. 2) пока-

зывает практически весь спектр изменений руслового режима после создания Камского водохранилища.

После повышения с 1956 г. базиса эрозии (наполнение водохранилища до временной отметки НПУ 108,0 м) и прекращения с 1994 г. дноуглубительных работ для поддержания гарантированной для участка глубины судового хода 280 см произошли крупные переформирования русла р. Кама. На устьевом участке р. Вишеры произошло закономерное врезание русла с отторжением левобережного побочня и причленением его оставшейся части к стрелке узла слияния рек. Часть продуктов размыва сформировала на Каме непосредственно ниже устья Вишеры крупный левобережный побочень, который в совокупности с изменением направления течения Вишеры привел к размыву правобережной части русла за исключением нижней части правобережного побочня, закрепленной капитальными выправительными сооружениями. Оставшаяся часть правобережного побочня начала соединяться с расположенным в средней части русла крупным осередком и перекрыла судовой ход, который был вынужденно перенесен по правилу «восьмерки». В соответствии с повышением базиса эрозии русла укрупненный осередок продолжал увеличивать свои размеры и постепенно превратился в остров Соломинский.

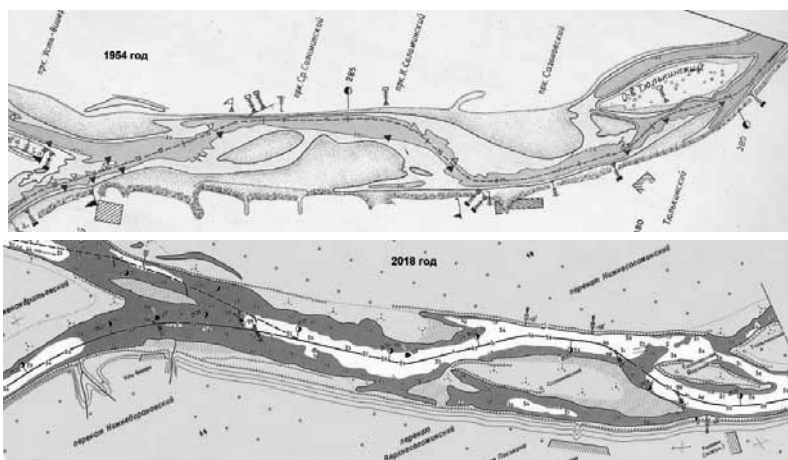


Рис. 2. Участок р. Кама от устья Вишеры до о. Тюлькинский

При переносе судового хода в районе о. Тюлькинського предпочтение было отдано более глубокому рукаву, расположенному вдоль ведущего правого берега. Однако новый поперечный судовой ход оказался неустой-

чивым и подверженным заносимости наносами, откладывающимися в ухвостье растущего острова Соломинский. Изменение после переноса судового скоростного поля потока с направлением его по сохранившейся верхней глубоководной части левобережной протоки в среднюю часть о. Тюлькинское привело к размыву и разделению острова на 2 части. Вновь образовавшаяся протока начала активно развиваться после прекращения дноуглубления на Нижнесоломинском перекате и в навигацию 2020 г. в нее был перенесен судовый ход.

С 2020 г. частично восстановлены гарантированные габариты судового хода до пристани Тюлькино. На вышерасположенном участке Камы судоходство возможно только в полноводный период северного завоза. Правительством Пермского края неоднократно ставился вопрос о восстановлении регулярного судоходства на участке Тюлькино-Бондюг, но это требует больших объемов дополнительного финансирования на выполнение дноуглубительных и выправительных работ. В условиях продолжающегося дефицита финансирования путевых работ из федерального бюджета это пока нереально.

Релаксационные изменения русла на участке устье р. Вишеры – с. Тюлькино продолжаются, и при отсутствии дноуглубления в ближайшие годы можно ожидать соединения о-во Соломинского и Верх. Тюлькинское, нежелательного развития левобережной воложки за о. Тюлькинский. Это требует продолжения научных и практических исследований для прогнозирования изменений русловых процессов и своевременного принятия решений в случаях необходимости стабилизации русла.

С.Н. Ковалев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ПРОБЛЕМЫ РЕКРЕАЦИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ОВРАЖНО-БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ В ГОРОДЕ
(НА ПРИМЕРЕ БРЯНСКИХ СУДКОВ В г. БРЯНСКЕ)***

К землям рекреационного назначения относятся земли, предназначенные и используемые для организации отдыха, туризма, физкультурно-оздоровительной и спортивной деятельности граждан. Но при этом из перечня выпадают многочисленные городские парки, лесопарки и особо охраняемые природные комплексы.

Главная проблема создания и использования рекреационных зон – это то, что часто они создаются на территориях непригодных к использованию в инфраструктуре. Зеленые насаждения рекреационных зоны очищают воздух города от пыли и газов, выбрасываемых автотранспортом и промышленными предприятиями. Помимо этого, даже небольшие массивы лесонасаждений служат пристанищем для животного мира и не только для птиц и мелких млекопитающих, но и в зависимости от площади и для крупных животных. Состояние и использование рекреационных зон в разных городах различно и в основном определяется не столько их функцией, сколько административно-хозяйственным подходом городских властей. Часто наблюдается перекраивание границ рекреационных зон, что приводит к уменьшению их площади.

Древний город Брянск не всегда был таким озелененным как сейчас. В настоящее время по доле зелёных насаждений в общей площади городской территории Брянск занимает 69 место из 83 городов центров субъектов Российской Федерации. Доля зеленых насаждений от общей городской площади всего 10,4%. В городе насчитывается 12 парков и скверов общей площадью 51 га, а состоящих на государственном кадастровом учете лесов, урочищ и балок общей площадью более 1,2 тыс. га. Из них на балки Брянские судки приходится 197,75 га, что составляет 16,5% от общей площади.

Овражно-балочные системы Судки – основные зеленые доминанты на исторической территории города. Значительная доля его центральной части располагается в пределах водосборов балок Верхние и Нижние Судки и представляет собой уникальный для центральной

© Ковалев С.Н., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова

России природно-архитектурный комплекс. Балкам города придан статус памятника природы областного значения. Несмотря на современную регулярную планировку, балки определили характер застройки центральной части города, разделив её на несколько, почти изолированных друг от друга, участков. Практически весь старинный и культурный центр города, современные государственные учреждения расположены непосредственно в пределах водосборов балок.

Протяженность балок составляет 2,5-3,0 км, ширина в устьевой части – 500-600 м, максимальная глубина – до 60 м. Сами по себе овражно-балочные системы Верхних и Нижних Судков представляет собой сложный, и в определенной мере опасный для города природный объект.

На бортах обеих балок, несмотря на попытки ограничить развитие эрозионных и склоновых процессов, они не только не затухают, но в некоторых местах наоборот активизируются. К усилению эрозионного процесса в черте города нередко приводит игнорирование особенностей рельефа, что совершенно недопустимо для города с перепадами высот до 60 м, какие имеются на территории г. Брянска. Значительно большее влияние, чем возведение больших домов, на процесс линейной эрозии на склонах балок оказывает строительство личных гаражей. Во-первых, они находятся на территории охраняемой природной территории, и, во-вторых, располагаются не только на бортах балки, но и встраиваются в их бортах или в естественных эрозионных понижениях.

Другая проблема Брянских Судков – дачные участки в вершинах балок. Сами по себе садовые участки, располагающиеся вблизи бровки склонов и на самих склонах балок, играют некоторую противоэрозионную роль – благодаря им значительная часть воды распыляется или задерживается. Но несмотря на попытки террасирования и укрепления бортов балки, занятых дачами, склоновые процессы не затухают, а в некоторых случаях даже активизируются. Вместе с тем уничтожение дачных участков и строительство многоэтажных зданий с применением тяжелой техники в верховьях балок может привести к активизации оврагообразования, что естественно повлечет за собой значительные капиталовложения на последующее планирование, организацию и сооружение противоэрозионных сооружений. Помимо всего балки отличаются большим количеством несанкционированных свалок строительного и бытового мусора. К ним присоединяется сброс неочищенных бытовых стоков.

Экологическая обстановка в балках все более обостряется. В основном это обуславливается отсутствием должного внимания к заповеднику. Это не только не допущение необдуманного вмешательства в

природный комплекс, но и его восстановление. Но, во-первых, город сразу же потеряет свою уникальность. Во-вторых, при уничтожении хотя бы части балок увеличится количество пыли, выхлопных газов, уменьшится степень озелененности, изменится качество воздуха. В-третьих, возможно изменение гидрологических условий, что соответственно может привести к подтоплению зданий, например, как это произошло в Волгограде. В-четвертых, затраты на возведение сооружений в таком сложном геологическом и геоморфологическом районе при соблюдении мер, предотвращающих возникновение опасных ситуаций со зданиями и для поддержания противоэрозионных мероприятий, которые в этом случае неизбежны, потребует огромных капиталовложений.

С.Н. Ковалев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОСОБЕННОСТИ СТОКА ВОДЫ В ОВРАГАХ В ПРЕДПОЛОВОДЬЕ*

Во всех природных зонах овраги являются аккумуляторами снега. Однако природные условия определяют характер аккумуляции и плотность снега, что, в свою очередь, определяют условия стока воды и наносов в начале снеготаяния. От типа весны – адвективного или солярного – зависит интенсивность стока воды в овраге. При солярном типе весны пики расходов воды в овраге и на полях практически совпадают по времени, в то время как при адвективном сток в оврагах имеет два пика. Первый связан со снеготаянием на водосборе, второй с таянием снега в овраге. Пики стока воды при адвективном значительно различаются по объемам стока, что связано с снегозапасами на водосборе и в самом овраге.

Плотность снега зависит от природно-климатических условий: в лесной зоне плотность снега – $0,12-0,18 \text{ г/см}^3$. В степной зоне и тундре плотность увеличивается до $0,4-0,45 \text{ г/см}^3$. За время снеготаяния меняется плотность снега от $0,35 \text{ г/см}^3$ в начале, $0,45 \text{ г/см}^3$ в разгар и до $0,5-0,6 \text{ г/см}^3$ в конце снеготаяния. При этом, при определенных условиях, происходит фирнизация снега. На глубине $1/3-1/2$ по мощности

© Ковалев С.Н., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова

снег приобретает вертикальную отдельность, что влияет на фильтрационные свойства толщи снега.

В лесной зоне сток воды при адвективном типе проходит по слабо уплотненному снегу. Древостой не позволяет ветру уплотнять снег во время метелей, весной затеняет его. В начале снеготаяния при минимальных объемах стока образуется поток русло поверх снега, формируется русло в снежной толще. При этом сток происходит с некоторой периодичностью по уклону. Первоначально происходит набухание снега на некотором расстоянии от вершины, он уплотняется, не дает просачиваться воде вниз и в нем образуется водоток с четко выраженным руслом. Сток воды в образовавшемся русле и само русло существует до выхода на разуплотненный снег. Происходит очередной цикл уплотнения снега и образования русла в снегу. По наблюдениям в Егоровом овраге (Боровский район Калужской обл., д. Сатино) первичная протяженность такого русла составляет 2-3 м. Этот процесс продолжается либо до выхода снежного русла в устье, либо с увеличением объемов стока воды, она наполняет весь объем снежной массы. В зависимости от уклона тальвега вода вместе с небольшим количеством наносов фильтруется через толщу снега и ускоряет таяние снега или может при сочетании масса/уклон сойти в виде селя, как это было в марте 1986 г. в Егоровом овраге. Время накопления воды в снеге в том же овраге, по наблюдениям, составило 56 часов. При солярном типе весны сток воды по снежному покрову происходит более интенсивно. Объем стока быстро нарастает и также быстро формируется «снежное» русло по всей длине оврага. Поскольку объем стока воды больше и ее температура несколько выше, чем при адвективном типе весны, в русле формируется своеобразная отмытка из снега, препятствующая быстрому размыву снега и фильтрации через него. Формирование массы наносов в овраге начинается еще до того, как начинается сток воды. При солярном типе весны протаивают борта южной экспозиции. Грунт в вязкопластичном состоянии сползает на снег и аккумулируется до начала стока. Вода, поступающая с водосбора в начале снеготаяния практически осветленная, и поэтому сток наносов, фиксируемый в замыкающем створе, не имеет отношения к эрозионной деятельности потока.

Плотность снега играет большую роль в формировании стока воды в овраге. Уплотненный снег, вследствие метелевого переноса на открытых пространствах степи и тундры, создает особые условия стока воды по снегу. Большое влияние на формировании стока воды в этих природных зонах имеет ориентировка овражной формы по отношению к основным сезонным направлениям ветров и погодные усло-

вия во время половодья. В степных районах, в основном сельскохозяйственно освоенных и с резким нарастанием температур весной, они приводят к резкому увеличению стока воды, иногда залповому стоку. Снег, скопившийся в овраге, быстро вымывается из него, при этом из-за не успевшего протаять грунта, эрозионная работа потока минимальна. В тундре, в частности на Ямале, сток воды по снегу во многом зависит от суточных и, даже, от часовых перепадов температур. Так при солярном типе весны достаточно нескольких часов для образования глубокой, до днища оврага, промоины. Из-за высокой плотности снега в начале при малых объемах стока формируется практически прямолинейное русло. В зависимости от площади водосбора и уровня антропогенной нагрузки при резком увеличении температуры, а это может составлять более 10°C, резко увеличивается объем стока. Русло, образованное в снегу, начинает меандрировать и врезаться в снежную массу. При развитии меандр и их смещению вниз по течению и врезании в снег в толще снега образуется винтообразный тоннель. Пространственное моделирование показало верность представления о совокупном смещении меандрирующего потока вниз по течению и в глубину снежного массива. Эрозионную работу при этом поток практически не производит. В первый момент стока, при прямолинейном русле, потоком выносятся наносы с водосбора, образовавшиеся в результате оттаивания мерзлого грунта. Размыв днища оврага происходит только тогда, когда поток достигает его, а бортов после почти полного стаивания снега в овраге.

С.В. Копытов, П.Ю. Санников

*Пермский государственный национальный
исследовательский университет*

ОСОБЕННОСТИ ЛИТОЛОГИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР КАМСКО-КЕЛЬТМИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ (СЕВЕРНОЕ ПРИКАМЬЕ) В КОНТЕКСТЕ МЕЖБАССЕЙНОВЫХ ПЕРЕЛИВОВ ЛЕДНИКОВО-ПОДПРУДНЫХ ВОД*

Особенности морфологического строения рельефа северо-востока Русской равнины (южная часть Республики Коми и север Пермского края) сегодня позволяют говорить о том, что во второй половине позднего плейстоцена речные бассейны рек северной и южной покатости

© Копытов С.В., Санников П.Ю., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (22-77-00086).

имели отличную от современного рисунка конфигурацию. Наиболее крупные межбассейновые перестройки состоялись между бассейнами Печоры, Вычегды и Камы. Изменения выражались в виде наличия «сухих» долин прорыва (спиллвеев), по размерам не соответствующим протекающим по ним в настоящее время водотокам, а также крупных озерных котловин. Заложение их, вероятно, происходило при сменах ледниковых эпох межледниковьями (московское оледенение – микulinское межледниковье или во время валдайского межстадиала).

Камско-Вычегодская перестройка могла происходить через Камско-Кельтминскую низменность, занятую в настоящее время рр. Северная и Южная Кельтма, Тимшер и Пильва. Дискуссионным пока остается вопрос о существовании здесь ледниково-подпрудного озера с уровнем в 130 м. Низменность занята крупными болотами, в пределах которых сохранились несколько средних и малых озер с максимальной глубиной до 6 м и площадью водного зеркала до 18 кв. км. Среди наиболее крупных можно отметить Большой Кумикуш, Новожилово, Челвинское, Сев. Кумикуш, Вост. Мал. Кумикуш, Дикое и др.

Стоит отметить, что все полученные материалы предыдущих лет, начиная со времени проектирования Верхнекамского водохранилища, основывались на изучении болот и долин рек (пойм и террас Камы, Тимшера, Юж. Кельтмы, Пильвы). Огромное количество фактического материала, полученного российскими и зарубежными исследователями в северной и южной частях региона, не затронуло озера Камско-Кельтминской низменности.

В летний и зимний периоды 2022-2023 гг. на озерах Челвинское ($60^{\circ}17'38''$ с.ш., $55^{\circ}17'51''$ в.д.) и Новожилово ($60^{\circ}19'18''$ с. ш., $55^{\circ}25'16''$ в. д.) были измерены глубины методом эхолотирования с лодки и лотом со льда. Глубина оз. Челвинского по результатам эхолотирования составляет в среднем 3,5 м, в наиболее глубоких частях (в южной части) увеличиваясь до 5 м. Максимальная глубина оз. Новожилово составила 3,7 м.

Для выяснения литологии донных отложений было пробурено 26 скважин по 3 поперечным профилям. Длина профиля на оз. Челвинское составила 775 м. Донные отложения представлены сапропелем неконсолидированным темно-коричневым; сапропелем коричневым с растительными остатками, торфом коричневым; плотным хорошо разлагаемым темно-коричневым торфом, сапропелем плотным, минеральным и песком. Мощность толщ сапропеля варьируется от 0,5 до 2,25 м, достигая максимума в опорной скважине СНОЛ-1 ($60^{\circ}17'3,808''$ с. ш., $55^{\circ}17'33,558''$ в. д.), а мощность толщ торфа изменяется от 1,6 м до 2,7 м.

Озеро Новожилово пробурено по двум профилям длиной 2940 м и 3435 м соответственно. Донные отложения представлены преимущественно илом коричневым, слабо консолидированным с растительными остатками; сапропелем плотным, минерализованным; илом серым с тонкими прослоями песка и единичными растительными остатками; песком с прослоями торфа. Мощность толщ сапропеля варьирует от 0,2 м до 4,25 м, достигая максимума в опорной скважине NZH-1 (60°19'45,067" с. ш., 55°25'48,374" в. д.).

На основании полученных данных (дифференциации слоев сапропеля, плотного ила, торфа и песка) можно сделать осторожный вывод о неравномерности заполнения котловин озер. В течение позднеледникового – голоцена чаши двух водоемов меняли свой уровень и, как следствие, площадь. Отсутствие в кернах сапропеля и ила может быть косвенным фактором относительной «молодости» участка озера, а присутствие мощных толщ органично-минеральных слоев, наоборот, показателем длительной истории формирования и смены фациальных обстановок. Можно предположить, что в позднеледниковые в пределах Камско-Кельтминской низменности существовало большое количество небольших по площади водоемов, часть которых позднее объединилась до размеров современных озер, а часть исчезла, осушив свои котловины. Расширение озер могло быть связано с процессами трансформации флювиальных систем в бассейне Верхней Камы в переходный период позднего плейстоцена и голоцена, изменением баланса эрозии и аккумуляции.

С целью установления времени заложения озер, проверки гипотез колебания уровня водоемов во время их существования, реконструкции ландшафтно-климатических обстановок были отобраны образцы на радиоуглеродный, диатомовый, хирономидный, гранулометрический, спорово-пыльцевой, карпологический (макроостатки) и антракологический анализы.

С.В. Копытов^{1,2}, А.В. Чернов^{5,6} Н.Е. Зарецкая^{3,4},
Д.А. Демаков², Е.Л. Лычагина^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, ²Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, ³Институт географии РАН, ⁴Геологический институт РАН, ⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ⁶Московский педагогический государственный университет

ЭВОЛЮЦИЯ ДОЛИНЫ КОСЫ (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ КАМЫ) В ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЬЕ И РАННЕМ ГОЛОЦЕНЕ*

Переход от позднего плейстоцена к голоцену в бассейне Верхней Камы ознаменовался значительной перестройкой флювиальных систем. В пределах рек и водоразделов сформировалось большое количество реликтовых форм рельефа, а человек, населявший берега рек и ручьев, был вынужден выбирать новые стратегии расселения.

Изучаемая территория находится в правобережной части бассейна Верхней Камы, в устье р. Лолог, где компактно расположены три мезолитические стоянки (Коса I, Коса II и Коса III). Долины Косы и Лолога здесь – широкие, состоят из поймы и надпойменных террас. Относительная высота первой надпойменной террасы 7-8 м над меженным урезов, второй – 17-19 м. Пойма представлена почти непрерывной полосой шириной 1-2 км вдоль Лолога и Косы, достигая максимального развития на участке их слияния. Правый борт долины Косы занят обширным грядово-мочажинным болотом Ыджиднюр. По высоте болото соответствует первой надпойменной террасе, но его поверхность полностью лишена следов гравистого флювиального рельефа. В пределах болота встречаются мелкие озера (Вад, Вадты, Ниж. Косинское, Маркош), вероятно являющиеся остатками древнего палеоводоема.

Для определения приуроченности археологических памятников к ландшафтам внутри речной долины было проведено палеорусловое картографирование. Для подтверждения предположений о возрасте генераций рельефа и верификации карты было проведено радиоуглеродное датирование образцов органических отложений, отобранных со дна палеорусел и ложбин.

Около 13800-13500 кал. л.н. (11900±60 л.н., ГИН-15886) территория правобережья Верхней Камы предположительно была более увлажненной, чем в последующие периоды позднеледниковья и голоцена – время активных перестроек гидросети. Протекающие по этой терри-

© Копытов С.В., Чернов А.В., Зарецкая Н.Е., Демаков Д.А., Лычагина Е.Л., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-68-10023)

тории реки формировали широкие долины, которые в настоящее время запечатлены в рельефе и отложениях второй надпойменной террасы. Ширина долины пра-Косы составляла 2,6-3 км (в настоящее время 1-2 км). Перигляциальные условия, сильные ветры, переносившие песок, обусловили наличие мощной эоловой толщи отложений на поверхности второй террасы и появление на ней дюн. В пределах дюн сформировались ландшафты сухих сосновых боров-зеленомошников.

В позднем дриасе в системе Коса-Лолог произошла перестройка речной сети: Лолог оставил прямую ложбину, соединявшую его с Косой по кратчайшему расстоянию, и отклонился влево – на север, обтекая оставленный рекой останец второй террасы. Его поверхность приобрела весьма комфортные условия для существования и жизнедеятельности человека. Возраст торфа на кровле хорошо отмытого среднезернистого песка, вскрытого скважиной 1028 на глубине 3,8 м, соотносится с началом голоцена – временем функционирования русла Лолога возле стоянок Коса I и Коса II.

Поздний дриас и ранний голоцен характеризовались переходом от квазиперигляциального климата – прохладного с возможным распространением еще нарастающей вечной мерзлоты, к относительно теплomu климату раннего атлантического периода. В это время рр. Коса и Лолог формировали поверхность современной первой надпойменной террасы. Возраст отложений, вскрытых скважиной 1034 составил 7980-7860 кал. л.н. (7100 ± 50 л.н., ГИН-15884).

Во время формирования первой надпойменной террасы русла обеих рек интенсивно меандрировали – следы их блужданий хорошо выражены в первичном пойменном рельефе. Размеры излучин обеих рек, формировавшихся в раннем голоцене, превышают параметры современных меандров. На протяжении голоцена эта разница стала снижаться, потом полностью исчезла. Об этом свидетельствуют параметры современных излучин, расположенных в пределах поймы. Водность Лолога снизилась.

Миграции русел Лолога и Косы в северном и восточном направлениях заставили мезолитического человека переместить место своего обитания примерно на 500 м к северо-востоку от предыдущего (Коса III, стоянка). Теперь русло Косы стало находиться от новой стоянки в 400 м к востоку. Местоположение этой стоянки было выбрано на невысокой песчаной дюне, осложняющей поверхность первой надпойменной террасы р. Косы.

В среднем и позднем голоцене на Косе и Лологе на фоне периодически возрастающей водности активизировались русловые деформации – у обеих рек увеличивался пояс меандрирования, стало более интенсивным образование новых переувлажненных пойменных массивов, осложненных многочисленными ложбинами и старицами.

С.Е. Коркин^{1,2}, Е.А. Коркина¹

¹Нижневартровский государственный университет,

²Институт экологии растений и животных УрО РАН

ФЛЮВИАЛЬНЫЕ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В ДОЛИНЕ РЕКИ ОБЬ*

В данной работе, представлены результаты, полученные на основе изучения разреза «Кирьяс», который вскрывает возвышенную Юганско-Ларьёганскую террасу долины реки Обь в пределах таёжной зоны Западно-Сибирской равнины и считается стратотипом подгоризонта каргинского горизонта.

Ниже представлено описание флювиальных позднеплейстоценовых отложений из разреза «Кирьяс». Слой D2 залегает на глубине 13,60–14,10 м. Песок мелкозернистый с тонкой горизонтальной слоистостью. Слойки 1–2 мм, темно-желтовато-коричневого цвета (10YR 4/6) с прослойками темно-оливково-серого цвета (5Y 5/2). В слое D_{ох}, а_q (14,10–15,55 м) до глубины 15 м песок переслаивается с легким суглинком. Граница ровная, переход по характеру слоистости. С глубин 14,65–14,70 м и 14,72–14,77 м получены результаты датирования образцов методом оптически стимулированной люминесценции в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ») возраст составил: 90±15 тыс. лет (RGI-0372), 78±10 тыс. лет (RGI-0373) соответственно. Слой D_q (15,55–18,53 м) представлен песком, палево-коричневым (2,5 Y 7/4), среднезернистым, горизонтально-слоистым. У верхней границы слой легко-суглинистый, мощностью 2–3 см оливковато-коричневого цвета (2,5Y 4/4). Внутри слоя слоистость диагональная. Слой D_{aq} залегает с глубины 18,53 м и до уреза. Он сложен песком, светло-оливковато-коричневым с темными прослойками (2,5Y 5/4). Горизонтально-диагональные прослойки мощностью 1–2 см очень темно-коричневого цвета (7,5YR 2,5/2). В верхней части слоя выделяется полоса мощностью 5 см красновато-коричневого цвета (7,5YR 5/8).

В целом разрез Кирьяс представлен горизонтами позднеплейстоценового времени [Gox-redt]–[Gth, cf]–[Gox]–[Gox, aq]–[Gh, cf1] – это комплекс глеевых горизонтов с явными признаками восстановленного железа (такие условия возможны при периодическом переувлажнении

© Коркин С.Е., Коркина Е.А., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства ХМАО-Югры № 22–17-20011, <https://rscf.ru/project/22-17-20011/>

и развитии болотных условий) и серий палеопочв: перегнойно-глеевой палеопочвой [Ah, aq]–[Gcf], с водно-аккумулятивными признаками и серо-гумусово-глеевой палеопочвой [AYcr]–[Gh,cf2]–[Gh] с криогенными признаками в виде клиньев, возраст которых составил 46647 (IGANAMS 5327 – калиброванная 14C AMS дата). Результаты радиоуглеродного датирования для разреза «Кирьяс», проведены в ЦКП «Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН и центра изотопных исследований Университета Джорджии (США). Нами выявлено, что Юганско-Ларьёган-ская возвышенная терраса долины реки Обь имеет непрерывное осадконакопление с мощными аллювиальными песчаными отложениями Казанцевской стадии (МИС 5) и палеопочвой, сформированной в период Кирьяской стадии (МИС 3).

В.Н. Коротаев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ПАЛЕОГЕОМОРФОЛОГИЯ ШЕЛЬФА КРЫМА И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДРЕВНЕЙ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ*

Шельф полуострова Крым подразделяется на Западный, Южный и Восточный. *Западный шельф* занимает северо-западную часть акватории Черного моря от Каркинитского залива до мыса Ай-Тодор в районе Алупки. Максимальная ширина шельфа от края материковой отмели на глубинах 100-150 м достигает 160 км. В районе Каламитского залива она сокращается до 70 км, между мысами Херсонес и Сарыч – до 25 км. Большая часть шельфа располагается в пределах Причерноморской впадины и частично принадлежит к району западного окончания горного сооружения Крымской геосинклинали [Мысливец и др., 2019]. Дно до глубины 25 м представляет собой ступенчатую плиту коренных пород, прикрытую тонким слоем песков с ракушей. Наиболее широкие участки внутреннего (80 км) и внешнего (50 км) шельфа, ограничены изобатами 50 м и 100-150 м соответственно. От внешнего края шельфа до глубин 1000 м располагается крутой материковый склон.

© Коротаев В.Н., 2023

* Выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00384 – полевые исследования совместно с Институтом океанологии РАН).

В приустьевой части большинства рек Западного Крыма (Булганак, Альма, Кача, Бельбек, Черная) в пределах внутреннего шельфа обнаружены погребенные подводные долины. Они представляют собой глубоко врезуемые, ущельеобразные формы с вертикальными стенками, заполненные рыхлыми осадками. Многие каньоны являются продолжением речной и овражно-балочной сети суши. В целом рельеф большей части шельфа можно определить как затопленную абразионно-аккумулятивную аллювиально-морскую равнину; внутреннюю его часть между мысом Тарханкут и Евпаторийским маяком и южнее мыса Лукулл – наклонную абразионную равнину.

Восточный шельф располагается от мыса Меганом вдоль Керченского полуострова до Керченского пролива и частично охватывает участок Таманского побережья до Анапы. Берега в большинстве случаев представлены абразионными мысами и абразионно-аккумулятивными бухтами. Аккумулятивные берега – это пересыпи или косы, отделяющие от моря лагуны и лиманы (районы Акташского, Чокракского, Тобечикского, Кояшского, Узунларского озер; аккумулятивный берег Феодосийского залива и Камыш-Бурунская коса). Шельф на участке от Феодосии до Керчи и далее до Анапы – отмельный, относительно выровненный. Ширина шельфа на продолжении Феодосийского залива – 45 км, глубина на внешнем крае – 90-100 м. У мыса Чауда ширина шельфа уменьшается до 25-30 км; глубина внешнего края – около 100 м. Далее на восток шельф снова расширяется, и к югу от Керченского пролива его ширина достигает 50 км, глубина внешнего края от 90 до 135 м.

В пределах Восточного шельфа были сформированы береговая отмель (0-5 м) и подводная абразионно-аккумулятивная терраса глубиной 20-50 м во время длительного стояния уровня Черного моря в новоэвксинский и еникальский периоды голоцена. Из элементов подводного рельефа обнаружены реликтовые подводные долины Дона и Старой Кубани, подводные каньоны.

Основным фоном, оказавшим наибольшее влияние на формирование рельефа и осадочной толщи береговой зоны и шельфа Крыма были крупномасштабная трансгрессивно-регрессивная ритмика уровня Черного моря и тектоническая активность береговых и аквальных морфоструктур. Согласно данным по литологии и геохронологии позднечетвертичных отложений шельфа Черного моря, береговая линия раннеэвксинского водоема (27-17 т. л. н.) находилась в районе современных изобат -90-80 м и почти весь шельф современного Черного моря выше этой изобаты был сушей, которая образовывала об-

ширную делювиально-эрозионно-аллювиальную равнину, покрытую лёссами.

Неоднократные крупномасштабные изменения уровня Черного моря в позднеплейстоценовый этап развития Черного моря обусловили формирование достаточно изменчивой структуры верхней части осадочного покрова шельфа, осложняет интерпретацию отдельных сейсмоотражающих горизонтов и их корреляцию. Верхний рубеж залегания поздне-новозвксинских отложений располагается на глубинах -30-35 м и достаточно выдержан по простиранию шельфа, что позволяет использовать их в качестве сейсмостратиграфического репера при расчленении осадочной толщи на границе внутреннего и внешнего шельфа, отделяющего позднехвалынскую серию от вышележащего голоценового комплекса.

В общем ходе голоценовой трансгрессии Черного моря выделяются пять фаз ускоренного подъема уровня (бугазский, витязевский, каламитский, джеметинский и нимфейский), разделенных относительно кратковременными фазами стабилизации или незначительного понижения уровня моря. В период начального (бугазского) этапа уровень моря к временному рубежу около 8,5 тыс. л.н. достиг отметок -20-25 м. Береговая линия этого возраста прослеживается по всему периметру северо-западного сектора черноморского шельфа и на побережье западного Крыма в виде погребенной аккумулятивной формы, отделяющей расположенное обширное поле лиманных отложений. Геоморфологически она представляет собой наиболее раннюю генерацию барьерных кос, сформировавшихся в ходе голоценовой эволюции абразионно-аккумулятивного берега на участке побережья к югу от мыса Лукулл и протягивающуюся с перерывами вплоть до северного окончания Евпаторийской бухты (м. Карантинный). Согласно данным бурения на приустьевых участках малых рек западного Крыма (Бельбек, Кача и др.) к этому временному рубежу относится начало ингрессии морских вод в низовья речных долин и формирования лиманов.

А.Г. Косицкий, Е.В. Белозёров

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА МАЛОИЗУЧЕННЫХ РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ*

Территория Черноморского побережья Краснодарского края традиционно привлекает поток туристов. Однако, для данного региона свойственен ряд опасных гидрологических процессов, к числу которых относятся наводнения, сопровождающиеся зачастую опасными русловыми процессами, в частности размывами берегов и пр. За последние десятилетия здесь произошло несколько серьезных наводнений, некоторые из которых, увы, сопровождались человеческими жертвами. Причины учащения наводнений могут быть связаны с климатическими изменениями, антропогенными факторами (застройкой пойм и сужением поперечных профилей долин) и др.

Одним из ключевых факторов максимальных уровней воды и опасных русловых процессов является максимальный сток рек. Для оценки закономерностей его формирования обычно используются данные гидрологических постов. Несмотря на то, что на данной относительно небольшой территории расположено 12 действующих постов Гидрометслужбы России, их данных оказывается недостаточно для полного выявления пространственных закономерностей формирования стока. Особенность исследуемой территории в том, что она представляет собой узкую полосу, заключенную между Главным хребтом Кавказских гор и Черным морем. Полоса эта на отдельных участках сужается до 2 км, в связи с чем здесь отсутствуют крупные и даже средние реки. Как известно, малые реки зачастую очень индивидуальны и значительно хуже поддаются пространственному анализу. Очевидно, что решение данной проблемы возможно лишь путем сгущения сети мониторинга.

В качестве дополнительного источника гидрологической информации могут служить данные станций автоматизированного измерения уровней воды НПК «Эмерсит». Эта организация совместно с МЧС Краснодарского края после наводнения в г. Крымске, произошедшего в июле 2012 г., установила более 250 станций по всей территории Края, большинство из которых расположены в бассейне р. Кубань, а

© Косицкий А.Г., Белозёров Е.В., 2023

* Выполнено по госзаданию кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051400038-1).

примерно третья часть на исследуемой территории Черноморских рек. Эти станции в автоматическом режиме проводят измерения уровня воды в реках (каждые 10 минут) и, в случае превышения уровнями неблагоприятных или опасных отметок, передают информацию в краевой МЧС, что позволяет своевременно оповещать население о возможных неблагоприятных ситуациях. Большинство станций работает с 2014 г., поэтому к настоящему времени по ним накоплен девятилетний период наблюдений. Учитывая количество этих станций, их использование позволяет многократно сгустить сеть мониторинга водных объектов исследуемой территории. Однако, станции НПК «Эмерсит» ведут наблюдения только за уровнями воды H , которые сами по себе плохо поддаются пространственным закономерностям из-за сильной зависимости их от локальных условий створов измерений: поперечного и продольного профиля речных долин, шероховатости русла и поймы и пр. Поэтому, для использования данных этих станций необходимо получение по ним расходов воды Q .

Начиная с 2016 г. сотрудники и студенты кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (при активном участии авторов) проводят исследования Черноморских рек Краснодарского края в створах, оборудованных станциями НПК «Эмерсит». Работы включают: поперечную нивелировку русел и пойм рек, измерение меженного уклона водной поверхности, многократные измерения расходов воды при разных уровнях. Данные измерения позволили построить кривые $Q = f(H)$ для большинства исследуемых створов и с их помощью восстановить расходы воды данных рек за весь девятилетний период. Примерно третью часть створов пришлось отбраковать из-за неустойчивости русел и, соответственно, сильной неоднозначности кривых $Q = f(H)$. Однако, для большинства створов кривые построить удалось, что позволило почти в четыре раза сгустить сеть гидрологического мониторинга Черноморских рек Краснодарского края.

Далее, используя синхронный период наблюдений на станциях НПК «Эмерсит» и гидрологических постах Гидрометслужбы России, предполагается привести данные по створам станций автоматизированного измерения уровней воды к многолетнему периоду и получить характеристики максимального стока разных обеспеченностей. Это позволит существенно уточнить пространственные закономерности максимального стока рек и дать рекомендации по снижению опасности гидрологических и русловых процессов в данном регионе.

Л.В. Куksина, А.С. Цыпленков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭРОЗИИ ПОЧВЫ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМА*

Изучение экстремальных эрозионных событий (ЭЭС) является важной задачей научных исследований во всем М мире, поскольку их последствия, как правило, имеют значительный социально-экономический эффект. Понимание основных факторов формирования и развития подобных событий может существенно упростить задачу разработки защитных мер для земель, подверженных риску воздействия эрозии. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных данной тематике, до сих пор не выполнен комплексный анализ роли различных природных и антропогенных факторов в формировании повторяемости и интенсивности ЭЭС для разнообразных горных областей. Кроме того, большая часть проведенных исследований не охватывают территорию бывшего СССР. Имеющиеся публикации, как правило, посвящены региональным, а чаще локальным исследованиям и не учитывают современных гидро-климатических условий.

Предлагаемое исследование направлено на изучение пространственных закономерностей изменчивости эрозии почвы на территории Крымского полуострова на основе универсального уравнения эрозии почвы (*RUSLE*) с использованием наилучших доступных баз данных для изучаемого региона. С целью проверки результатов наших исследований было выполнено сравнение полученных оценок потерь почвы со значениями стока взвешенных наносов (СВН), измеренных на стационарных постах Крымского УГМС. Несмотря на то, что СВН объединяет различные процессы эрозии и аккумуляции в пределах речного бассейна, было установлено наличие достаточно тесной взаимосвязи (коэффициент корреляции порядка 0.67) между СВН и полученными нами оценками потерь почвы.

Эрозия почвы оценивалась для двух периодов: 1958–1988 и 1989–2018 гг. Распад СССР в 1991 г. повлек за собой значительные изменения в характере землепользования на территории Крыма (Hartvigsen,

© Куksина Л.В., Цыпленков А.С., 2023

* Выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051200166-4 – сбор и обработка данных стационарных наблюдений) при поддержке РФФИ (проект № 20-35-70035)

2014). Согласно предыдущим исследованиям, площадь пахотных земель в Крыму в 1990-2010 гг. сократилась на 10% (Lesiv et al., 2018) с ~18700 км² до ~15700 км². Наиболее значительные изменения произошли в северной части Крыма (сокращение пахотных земель достигло 23%) и на Керченском полуострове (16%).

Оценка среднегодовой эрозии почвы для периодов 1958-1988 и 1989-2018 гг. показала, что в наибольшей степени подвержены эрозии горные районы Южного Крыма, что преимущественно связано с высокими значениями индекса эрозионной способности осадков (*R* фактор) и большой крутизной склонов (*LS* фактор). Среднегодовая величина потерь почвы, согласно нашим оценкам, составляла порядка 23.7 млн. т (при средней скорости эрозии 0.67 т/га·в год) до 1988 г., и 20.7 млн т (при скорости 0.58 т/га в год) после 1989 г.

В целом, проведенное исследование не обнаруживает значительных изменений в пространственном распределении эрозии почвы. В 1958-1988 гг. порядка 3590 га (13.9% территории) были подвержены риску эрозии почв от умеренного до крайне высокого, в то время как для периода 1989-2018 гг. величина составила порядка 3490 га (13.5%). Результаты проведенной работы позволяют по-новому взглянуть на риски развития эрозии почвы в Крыму. Они могут способствовать выявлению приоритетных областей, нуждающихся в более детальном изучения и разработки мер по минимизации эрозии почвы.

А.А. Куракова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ОЦЕНКА ОПАСНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА РАВНИННЫХ РЕКАХ*

Русловые процессы и размывы берегов – одна из наиболее распространенных и ярких форм проявления их опасных проявлений, природные явления, угрожающие разрушением прибрежных территории населенных пунктов, созданием аварийных ситуаций для инженерных сооружений и коммуникаций, осложняющее судоходство, ведущее к потенциальной потере ценных сельскохозяйственных и лес-

© Куракова А.А., 2023

* Выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (№121051200166-4) при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00065).

ных угодий и в целом затрудняющее освоение рек и приречных территорий. Они могут быть обусловлены как естественными причинами, так и усилены в ходе освоения рек и прибрежных земель. Выделяют потенциальную и реальную опасность русловых процессов. В первом случае опасность присутствует всегда, и ее надо учитывать при освоении территории, зная закономерности и направленность развития процессов, вторая представляет собой уже существующую угрозу. Объект может быть построен тогда, когда опасности не было, но в ходе русловых деформаций она создалась. На реках со слабоустойчивым руслом в свободных условиях всегда есть потенциальная опасность размыва берегов.

В различных подходах к оценке опасности русловых процессов размывы берегов включены как один из главных факторов, характеризующих их интенсивность. Степень и частота проявления опасных русловых процессов зависит от устойчивости – интенсивности русловых переформирований, которая оценивается числами Лохтина $L = \frac{d}{t}$ и

коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева $K_c = \frac{d}{tb_p} 1000$, где d –

крупность донных наносов, мм; I – уклон, ‰ (в K_c – безразмерный); b_p – ширина русла реки, м.

В зависимости от градации устойчивости речных русел для них характерны определенные скорости размывов или намывов берегов (средние и максимальные) и смещения форм руслового рельефа (осередков и побочней), протяженность фронта размыва, периодичность горизонтальных русловых деформаций или развития рукавов. Выделяют русла от абсолютно неустойчивых (с высокой степенью интенсивности русловых деформаций) до абсолютно устойчивых, когда какие-либо русловые переформирования отсутствуют.

Исследование посвящено среднему и нижнему течению Оби (от устья р. Томи до г. Салехарда), нижнему Иртышу (от устья р. Тары до слияния с Обью) и наиболее крупным их притокам: Томи, Чулыму, Кети, Тыму, Ваху, Тромъегану, Агану, Лямину, Казыму, Полулю, Парабели, Васюгану, Большому Югану, Северной Сосьве, Демьянке, Тоболу, Туре, Тавде и Конде. Рассматриваемые русла рек формируются в пределах лесной зоны в сходных и относительно однородных геолого-геоморфологических условиях. Они представляют собой равнинные реки с небольшими уклонами, относительно однородным литологическим составом аллювиальных отложений (пески, супеси и легкие суг-

линки), слагающих пойму и надпойменные террасы, что обуславливает активные горизонтальные русловые деформации.

В ходе исследования размывы берегов были получены на основе сопоставления разновременных космических снимков серий «CORONA KH-4A, B», «Landsat 1, 2 MSS», «Landsat 4, 5 TM», «Landsat 7», «Sentinel-2» за два временных интервала: 60-80-е гг. – 2016-2021 гг., которые обрабатывались полуавтоматизированным методом с помощью инструментов в программе ГИС ArcGIS Desktop. В результате были получены характеристики размываемых берегов: средние ($C_{\text{ср}}$, м/год) и среднемаксимальные ($C_{\text{срmax}}$, м/год) скорости размыва берегов и протяженности размываемого берега ($L_{\text{фр}}$, км). Разрешение космических снимков, временные интервалы и точность методики определяют пороговое значение определяемых скоростей размыва берегов – от 0,5 м/год для Оби и 1 м/год для остальных рек.

Русла рек Обь-Иртышского бассейна формируются в свободных и относительно однородных условиях, где широко распространены размывы берегов, характеризующиеся высокими темпами. Протяженность и положение фронтов размыва отражают характер смещения форм русла (излучин или рукавов), а скорости – интенсивность горизонтальных русловых деформаций. Размывы берегов не только создают опасность для освоения приречных территорий и водных ресурсов, но и выступают источником поступления наносов в русло, которые, аккумулируясь ниже по течению, приводят к обмелению перекатов, затрудняют судоходство.

Средняя и нижняя Обь и нижний Иртыш имеют преимущественно относительно устойчивые русла и, соответственно, умеренную опасность. На их притоках опасность русловых процессов относительно невысокая (1-2 балла), увеличиваясь вниз по течению и достигая 3 баллов в низовьях крупных рек (Томь и Чулым). При этом в целом для рек Обь-Иртышского бассейна интенсивность размыва берегов, а, соответственно, и степень опасности горизонтальных русловых деформаций снижается в направлении к северу и к Обь-Иртышскому междуречью.

Полученные результаты можно использовать для разработки рекомендаций по безопасному использованию водных ресурсов территории и эффективному управлению русловыми процессами, в том числе их опасными проявлениями.

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТКРЫТЫХ ВОДОТОКОВ

Россия обладает громадной сетью естественных, глубоководных речных потоков. Помимо решения проблем энергетики и водоснабжения это позволило создать разветвленную и протяженную сеть внутренних водных путей. Учитывая природные особенности поведения водных потоков и постоянный рост необходимых габаритов водных путей для организации рентабельного судоходства, вопрос о судоходных глубинах на конкретном участке стал краеугольным. Дополнительным катализатором усложнения этого вопроса стало повышения объёмов дно углубления транзитного судоходства, а также добыча нерудных строительных материалов (НСМ) из русла реки.

Известно, что неконтролируемая добыча НСМ ведет к «посадке» свободной поверхности на прилегающих участках реки и как следствие – к срыву транзитных судоходных глубин. Для предотвращения проявления подобного негативного развития событий крайне эффективной является предварительная расчетная оценка просадки уровней на участке реки и введения ограничения на объем извлекаемого грунта из русла реки.

Вопросами расчета отметки свободной поверхности речного потока занимались многие ученые на протяжении последних 80 лет. Первые методы базировались на оценке сопротивления русла как пулу суммы сопротивлений контрольных сечений на краях участка, осредненной по всей длине. Для более или менее корректного расчета весь участок реки разбивался на несколько подучастков, в пределах которых сопротивление русла (и как результат – перепад отметок свободной поверхности воды) можно было считать линейным. Увеличение разбивки на подучастки, как правило, вело к росту объема расчетной работы, и как правило назначалось весьма субъективно. В результате все накапливающиеся неточности нивелировались валидацией коэффициента шероховатости. При этом последний принимался одинаковым на всем участке, что весьма спорно при переходе потока на пойменную часть сечения или изменении других морфометрических характеристик конкретного сечения. Помимо этого, изначально метод не

учитывал изменения сопротивления русла при изменении рабочего уровня, что было исправлено в методе Павловского.

С развитием вычислительной техники и персональных компьютеров в практику стали внедряться численные методы интегрирования уравнения динамики поведения свободной поверхности. При этом в качестве отправной точки для решения задачи использовался вариант движения одномерной волны вдоль оси координат. Наиболее показательными здесь являются работы А.В. Москаля (ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова). В качестве топологических данных им использовались контрольные профили ряда живых сечений (двухмерный массив зависимости ширины на свободной поверхности от глубины потока) и массив расстояний между контрольными сечениями. Возникающие при этом ошибки в аппроксимации поверхности русла нивелировались с помощью коэффициента шероховатости, который подбирался при валидации модели.

Данная методика была впоследствии принята и закреплена документально министерством речного флота как основная для оценки посадки уровня воды при разработке карьеров, несмотря на ряд существенных допусков при ее реализации. В конечном итоге, эти упрощения уводили расчетных значения далеко от истинных значений.

Следующим знаковым этапом в развитии подходов к расчету свободных поверхностей потока являются работы В.В. Белякова. В отличие от предшественников, он напрямую интегрирует уравнение Сен-Венана методом конечного элемента. В своей основе уравнения Сен-Венана описывают поведение одномерной волны, поэтому для получения корректной плановой картины им активно применяется дополнительная процедура покомпонентного разделения модулей скоростей на их осевые компоненты. В результате решение получается двухмерным и позволяет переходить к решению плановой задачи эрозии – аккумуляции на участке реки. На сегодняшний день подход В. В. Беликова является наиболее совершенным и апробированным для практических задач. Несмотря на это реализация подхода В.В. Беликова в ряде случаев дает крайне спорные результаты. Это касается случаев резких изгибов русла реки и разветвлений. Конечно, валидация модели под натурные данные, пытается нивелировать неточности в аппроксимации поверхности русла. Но возможности этого подхода не бесконечны из-за базовых допущений, которые были сделаны при выводе уравнений Сен-Венана из полной системы уравнений движения реального потока жидкости Навье-Стокса. В первую очередь это связано с тем, что в уравнениях Сен-Венана описывается одномерная волна и только в конце решение преобразуется в двухмерное.

Несмотря на вышеизложенные допущения, подход В. В. Беликова ближайшие годы будет преобладающим, так как он не требует значительного вычислительного ресурса на реализацию, в отличие от решения уравнений Навье-Стокса. Тем не менее, развитие быстродействия вычислительной техники уже сегодня позволяет достаточно корректно моделировать 7-10 километровые участки реки и совершенствовать расчетные модели, активно переходя от гидравлических и гидромеханических подходов к гидродинамическим решениям.

Ф.Н. Лисецкий

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

РЕГИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА ДНОУГЛУБЛЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ: ПОДХОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ *

На территории Белгородской области, как показал составленный сотрудниками Центра аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов (НИУ «БелГУ») полный реестр постоянных и пересыхающих водотоков, насчитывается 601 река суммарной протяженностью 4564 км. Кроме того, к настоящему времени в регионе создано более 1200 прудов и водохранилищ. Путем сравнительного анализа разновременных картографических материалов установлено, что в период с конца XVIII в. к XX в. длина речной сети на Белгородчине сократилась почти на 38%, при средней скорости деградации длины водотоков порядка 15 км/год. Эти факты и полученные научными учреждениями оценки гидроэкологической и водохозяйственной ситуации во многом способствовали формированию комплексной программы по оздоровлению поверхностных водных объектов региона. С 2022 года в соответствии с программой «Развитие водного и лесного хозяйства Белгородской области» в регионе проводился, по-видимому, беспрецедентный не только для этой территории, но и для всей страны объем работ по расчистке водных объектов. Особенность в выборе первоочередных водных объектов для расчистки участков речных русел и акваторий прудов и водохранилищ обусловлена предоставленной возможностью для местных сообществ принять участие в онлайн голосовании в социальной сети. Местные сообщества сформировали пул из

© Лисецкий Ф.Н., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания №FZWG-2023-0011.

740 таких объектов (реки, водохранилища, пруды) протяженностью более 2000 км и общей площадью около 5000 кв. км. Следует отметить, что реализацию программы по расчистке русел и акваторий водных объектов предвзяли масштабные работы по определению зон затопления в поймах рек, что позволило установить границы зон затопления территорий, затапливаемых при максимальных уровнях воды 1, 3, 5, 10, 25 и 50%-ной обеспеченности. Границы зон затопления установлены методом превышений с использованием цифровой модели рельефа и данных о высших уровнях воды в реках региона.

Комплекс работ по обоснованию мероприятий, направленных на расчистку приоритетных участков речных русел и акваторий прудов и водохранилищ, включал следующие задачи: оценка современного состояния и прогноз возможных изменений окружающей среды при проведении работ по расчистке речного русла и/или береговой зоны водного объекта; полевые работы (отбор проб воды и донных отложений); определение химического состава донных отложений на содержание тяжелых металлов и других загрязнителей; определение класса опасности донных отложений в соответствии с действующими нормативно-правовыми документами; оценка экологического состояния флоры и фауны; прогноз изменений окружающей среды в результате проведения работ на водном объекте; разработка рекомендаций по предотвращению негативных последствий, оздоровлению природной среды при осуществлении планируемой деятельности. Для научного и практического обоснования работ изучали геоморфологические и геоэкологические условия мест проведения работ как по оригинальным данным, полученным в результате полевых изысканий и аналитических исследований, так и по материалам, содержащимся в государственном фонде данных и отражающих результаты проведения землеустройства, а также по материалам из ведомственных фондов. Работы по расчистке русла реки водного объекта являются природоохранным мероприятием и проводятся без капитального строительства, благоустройства и озеленения. Для расчистки берегов от жёсткой околосводной растительности и изъятия крупных отходов используется земснаряд *Watermaster*. С экологических позиций обоснованы местоположения необходимых по площади карт намыва. Выборка, полученная для экологической оценки донных отложений в реках и прудах ($n=65$), показала, что сильная вариация ($V>20\%$) присуща таким показателям, как $Mn> \text{Карбонаты} >Co> \text{Фосфат ион} >Cu> \text{Органическое вещество} >Zn>Pb> \text{Нитраты } NO_3> \text{Нитриты } NO_2$; средняя вариация ($V=10-20\%$) отмечена для азота аммонийного и нефтепродуктов. Среди тяжелых металлов в донных отложениях рек и прудов наибольшие превышения ПДК отмечены для Mn, Cu, Pb .

В 2022 году были обеспечены проектными решениями и технической реконструкцией 65 участков водных объектов и более 417 кв. м

акваторий, что в два раза превысило первоначально планируемый объем работ. В текущем году в рамках новой региональной программы «Наши реки», инициированной губернатором, планируется провести расчистку русел и акваторий 50 водных объектов. В частности, запланирована расчистка русла и одного из притоков в бассейне р. Везёлка (длина 28 км). Участок русла Везёлки в черте г. Белгород и ранее периодически подвергался расчистке средствами гидромеханизации (в 1980-1982 гг., в 1999-2000 гг.), что определило следующие параметры расширенного русла: ширина – 37-45 м, глубины – 2,4-2,5 м). Эта река имеет важное значение из-за того, что она единственная среди малых рек региона, где имеется гидрологический пост. Анализ динамики расхода воды по гидропосту Болхолец показывает, что, если за 1947-1990 гг. средний годовой расход воды составлял $1,23 \pm 0,07$ ($0,34 \div 2,18$) м³/с, то в последние три десятилетия он существенно снизился до $0,51 \pm 0,03$ ($0,24 \div 0,88$) м³/с. В урбанизированном ландшафте низовье реки, функционирующее по озёрному типу, находится в парковой зоне и используется в рекреационных целях. При этом, как показали наши данные, класс качества воды меняется во внутригодовом режиме от 4-го класса (загрязнённая) до 6-го класса (очень грязная). В частности, наблюдается превышение ПДК, установленных для рыбохозяйственных водоёмов, по таким показателям как медь, железо общее, БПК₅, нефтепродукты и азот аммонийный.

Г.В. Лобанов, М.И. Сарнецкая

Брянский государственный университет имени акад. И.Г. Петровского

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ СТОКА МАЛЫХ РЕК БАСЕЙНА СРЕДНЕЙ ДЕСНЫ

Представления о влиянии современных климатических изменений на отдельные компоненты ландшафта остаются весьма разнообразными. Разброс оценок проявляется не только на количественном уровне, т.е. в масштабах влияния, но даже на качественном – в обосновании направления воздействия. Не останавливаясь подробно на причинах научной полемики, отметим, что разнообразие оценок, а значит и их неопределённость, снижает исторический подход – изучение реакции ландшафтов или их отдельных компонентов на изменение климата за продолжительный промежуток времени. В частности, изменения климата заметно отражаются в динамике гидрологических харак-

теристик малых рек, более выраженной в сравнении с крупными реками.

Нами рассмотрено влияние изменений факторов стока, прежде всего климатических во второй половине XX – начале XXI века на динамику средних, максимальных и минимальных расходов на малых и средних реках бассейна средней Десны. Сложность однозначной оценки влияния климата связана с одновременным изменением других факторов стока, в частности ландшафтной структуры водосборов, которая косвенно характеризует перемены в хозяйстве. Районом исследования выбрана средняя часть бассейна р. Десна в границах Брянской области, которая отличается большим разнообразием ландшафтов и вариантов их хозяйственного использования. Территория характеризуется значительной распаханностью и небольшой лесистостью от 5 до 13%. Естественная растительность представлена смешанными лесами на водоразделах (елово-мелколиственными с примесью широколиственных пород) и сосняками на террасах.

Модельными объектами выбраны реки с наиболее продолжительными рядами наблюдений – от середины XX века до второго десятилетия XXI века (всего 4). Материалы для изучения изменения факторов стока составляют данные гидропостов, метеостанций (всего 3), разновременные картографические материалы и спутниковые снимки. Гидрограф объектов исследования аналогичен: выраженный максимум весеннего половодья в апреле, межень в конце лета – начале осени, слабо выраженный нерегулярный паводок в конце осени и зимняя межень (большей водности, чем летняя).

Направления изменений гидрологических характеристик за 70 лет заметно различаются. Минимальный сток на модельных объектах увеличился в среднем в 1,5–2,5 раза. Особенно выделяется малая река Коста (приток р. Судость), минимальный сток которой увеличился в 20–30 раз. За то же время средние и максимальные расходы сократились соответственно в 1,1–1,3 и 2,0–4,0 раза.

Для объяснения причин такой существенной динамики использованы сведения об изменении климатических характеристик (среднегодовой температуры, количества осадков, состояния снежного покрова в конце зимы, температуры почвы перед снеготаянием, расчётной величины испарения) и ландшафтной структуры водосборов (лесистости и заболоченности). Распаханность водосборов обратно связана с лесистостью, поскольку доля площади иных угодий незначительна.

Характеристики климата во второй половине XX – начале XXI века изменялись весьма заметно. Среднегодовая температура выросла от 5,2 °C в середине XX века до 7,4 °C к началу XXI века, причём более за счёт повышения температуры зимы. Годовое количество осадков снизилось с 620 мм до 550 мм (приведены средние показатели

за десятилетие). Закономерно увеличились расчётные показатели испарения (расчёт по методу Торнтвейта). Вместе с тем, климатические особенности конца зимы, важные для формирования стока, изменялись без выраженной ритмической или поступательной динамики – средняя высота снежного покрова и температура почвы перед снеготаянием значительно колебались от года к году.

Лесистость водосборов от послевоенных лет к настоящему времени увеличилась; на ряде водосборов, в том числе модельных, заметно – в 1,2–1,7 раза. Причина увеличения лесистости – в изменении значения древесины в хозяйстве. В конце XX века сокращение сельского населения и уменьшение потребности в древесине, в сочетании с лесовосстановлением способствовало частичному увеличению площади лесов. Заметный рост лесистости объясняется изначально небольшой долей площади лесов – незначительный объём лесовосстановления обеспечивает существенный прирост лесистости. Вместе с тем, регулирующее влияние лесов на сток ограничивается небольшим средним возрастом насаждений, активная эксплуатация которых продолжается до настоящего времени. Доля болот в общей площади территории, в целом небольшая, к настоящему времени ещё уменьшилась. Среди болот преобладают низинные, сосредоточенные в долинах рек. Сокращение их площади было целенаправленным – из-за осушения пойменных лугов.

Сравнительный анализ динамики факторов стока показывает, что изменениями гидрологических характеристик управляют, прежде всего, изменения климата. Рост температуры, осадков и расчётного испарения удовлетворительно объясняет снижение среднегодовых расходов. Уменьшение максимальных расходов (весеннего половодья) обусловлено сокращением запасов воды в снеге в конце зимы. Хотя высота снежного покрова заметно не изменяется, существенно преобразуется его структура. Увеличение количества оттепелей в первой половине зимы определяет формирование снежного покрова в конце зимы заново – с менее плотной структурой и меньшими запасами воды. Влияние сокращения площади болот и увеличения лесистости на максимальный и средний сток (соответственно, рост и уменьшение) взаимно компенсированы. Рост минимального стока, напротив, лучше согласуется с направленными изменениями ландшафтной структуры водосборов. Увеличение площади лесов способствует поддержанию стока в маловодный период, мелиоративные системы обеспечивают интенсивную отдачу воды после дождей, а многочисленные пруды аккумулируют часть весеннего стока и являются в период дефицита осадков важными источниками питания малых рек.

Н.М. Михайлова, Л.А. Турыкин, Д.В. Ботавин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ ПОЛУГОРНЫХ УЧАСТКОВ РЕК БАСЕЙНА р. КУБАНИ*

С 2018 г. авторами начали проводиться стационарные наблюдения за деформациями участков русел рек бассейна Кубани. Местоположение участков стационарных наблюдений были выбраны таким образом, чтобы охватить разные типы русла, формирующиеся в переходной области от гор к равнинам, характеризующиеся наибольшими деформациями. В настоящее время наблюдения проводятся на реках Кубань, Большой Зеленчук, Уруп, Лаба, Белая, Пшеха, Псекупс, Адагум, Неберджай, Баканка и др. Оценка интенсивности горизонтальных деформаций (размыва берегов) проводится по спутниковым снимкам, Sentinel 2 и Landsat, ортофотопланам и ЦММ, полученным с помощью БПЛА, а также по снимкам высокого разрешения (0,3 м), предоставленным Центром коллективного пользования «Геопортал» МГУ имени М.В.Ломоносова. На стационарах выполняются геодезическая съемка, наблюдение за водным режимом и вертикальными деформациями, измерения расходов воды и оценка состава донных береговых отложений. Для оценки изменений многолетних гидрологических характеристик использованы данные об измеренных расходах воды, начиная с 1936 г.

Анализ уклонов рельефа в целом и рек показал, что при различных уклонах формируются разные типы русел, отличающиеся по морфологии, направленными и текущим деформациям, приводящими к частой перестройке русел. Например, извилистое русло с медленными направленными деформациями формируется при уклонах 0,15-0,35 ‰, на фоне направленных деформаций эпизодические появляются в извилистом русле при уклонах 0,8-1,0 ‰, пойменная многорукавность – при уклонах 1,2-1,4 ‰; разветвленное блуждающее русло (осередковое) – 1,5-1,7 ‰; по мере увеличения уклонов на таких руслах появляются островные массивы. Участки русла с активными русловыми деформациями формируются при уклонах менее 8 ‰.

Ввиду того, что изменение водности и прохождение паводков на разных реках бассейна проходят не одновременно, наибольшие де-

© Михайлова Н.М., Турыкин Л.А., Ботавин Д.В., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00065) (выполнены анализ деформаций и обработка результатов стационарных наблюдений) и содействии ЦКП Геопортал, МГУ (предоставлены космические снимки).

формации русел рек наблюдается также в разные годы. Наблюдения за деформациями производятся регулярно – по возможности до и после прохождения паводков и в период межени. Выполнен подробный анализ горизонтальных деформаций русел при изменении водности рек, как за период стационарных наблюдений, так и до их организации. Выявлено, что максимальные горизонтальные деформации на реках бассейна происходят не только при прохождении быстро формирующихся паводков низкой обеспеченности, но и при прохождении более низких паводков. Наибольшее отступление берегов на р. Адагум и притоках (до 8-15 м/год) отмечено после прохождения расходов 25–30 м³/с, что соизмеримо или превышает величины деформаций при паводках низкой обеспеченности (на Адагуме – более 80 м³/с). Аналогичная ситуация наблюдается и на других реках бассейна.

Темпы горизонтальных деформаций определяются строением берегов и подстилающих русло трудно размываемых отложений. По результатам стационарных наблюдений в уступах размываемых берегов определены состав и уровни залегания слоев легко размываемых рыхлых отложений и подстилающих их плотных устойчивых к размыву грунтов, что позволило проанализировать возможный процесс размыва берега на разных участках рек при изменении водности. На полугорных реках с большими уклонами легкоразмываемые отложения представлены валунами и галечниками на разных уровнях. На таких участках, начиная от почвенного горизонта, стратиграфия выражена чередованием слоев: суглинки, мелкий и средний галечник, суглинки или супеси, пески, крупная галька и валуны с примесью песка, суглинки, глины. Очевидно, что рыхлые отложения (пески, галька) вымываются в первую очередь, т.е. размыв начинается с вымывания слоя песка в кровле и внутри песчано-галечного горизонта при воздействии на него потока, что приводит к выпадению крупных валунов и гальки, формированию полого откоса в нижней части берегового уступа, после чего происходит обрушение верхних перекрывающих суглинистых и почвенных горизонтов, которые сразу полностью размываются. Так как легкоразмываемые отложения находятся на разных уровнях, то и размыв берега на соседних участках русла происходит при прохождении расходов разной обеспеченности. Так, на Кубани на одном из стационаров верхняя граница песчаного горизонта располагается на уровне от 2 до 2,5 м над меженным урезом, на р. Белой – 1,6 м, а в 300 м ниже по течению уступ противоположного берега почти весь сложен супесями с редкими прослойками песка и гальки на разных уровнях (от 1 до 3 м над урезом межени) и активно размывается при разных уровнях. По мере выполаживания рельефа состав береговых отложений сменяется на более однородный или состоящий из меньшего количества слоев, появляются мощные суглинистые (в т.ч. легкие лессовидные

суглинки) и супесчаные горизонты, пропадают песчаный и валунно-галечный с примесью песков горизонты, в нижней части береговых уступов обнажается тонкий горизонт мелкой и средней гальки и глины. Для берегов с таким составом отложений больше свойственно оползание, размеры оползней возрастают с увеличением уровней и продолжительности воздействия потока. Оползневой массив выполаживает склон, постепенно размываясь рекой, происходит вторичное обрушение пологих склонов при прохождении более низких паводков. При появлении в русле в результате врезания трудно размываемых глинистых отложений темпы горизонтальных деформаций могут увеличиться более, чем в два раза.

На увеличение темпов горизонтальных деформаций влияет угол подхода потока к берегу, степень развитости излучин или вогнутости берегов рукавов разветвлений, смещение крупных аллювиальных форм (перекатов), высота уступа пойменного берега и др.

Спрявление излучин и развитие рукавов разветвлений происходит при прохождении расходов, значительно превышающих верхний интервал руслоформирующего расхода. Например, на р. Кубани ниже г. Армавира при достижении необходимой для спрямления в этих условиях ширины перемычки между крыльями излучины ее спрямление произошло лишь при достижении расхода выше $800 \text{ м}^3/\text{с}$, что более чем в два раза превышает руслоформирующий (около $400 \text{ м}^3/\text{с}$).

Вертикальные деформации на полугорных реках бассейна Кубани характеризуются как интенсивным врезанием, так и повышением отметок дна вследствие направленной аккумуляции наносов. На участках разветвленного (блуждающего) русла с преобладанием эпизодических деформаций может преобладать аккумуляция наносов в среднем за многолетний период $0,4\text{--}0,6 \text{ см/год}$ (например, на р. Большом Зеленчуке), однако результаты стационарных наблюдений показали, что на отдельных участках при прохождении высоких паводков эти значения могут увеличиваться в несколько раз, что зависит от морфологии русла и движения гряд на конкретных участках. Например, на р. Лабе после прохождения высоких паводков проводят расчистку русла и выравнивают сформировавшиеся валунами и галькой гряды под мостовыми переходами. Определение темпов врезания по зависимостям $Q=f(H)$ осложняется высокой горизонтальной динамикой русел и движением гряд. Зависимости $b_p=f(Q)$ показывают крайне высокий разброс в смежные годы: например, на р. Кубани изменение ширины потока при одном и том же расходе воды составляет до 30 м в межень. Однако при введении поправок удалось получить более ли менее достоверные средние значения вертикальных деформаций.

Р.А. Медведева, О.П. Ермолаев
Казанский (Приволжский) федеральный университет

СОВРЕМЕННАЯ ОВРАЖНАЯ СЕТЬ НА ТЕРРИТОРИИ ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ*

Оценка современного овражного расчленения в области интенсивного земледелия России – актуальная задача. Она может быть решена путем геоинформационного картографирования по данным ДЗЗ высокого разрешения. Цель исследования – анализ современного пространственного распределения густоты овражной сети на территории Оренбургской области. Общая площадь территории исследования составила 22116 км².

Территория исследования находится в междуречье бассейнов рек Самары и Ика, расположена в лесостепной и степной зонах. Лесостепь, представленная южной лесостепной подзоной, распространена на севере области, её характеризуют разнотравно-ковыльные степи на типичных чернозёмах с островными лесами на выщелоченных черноземах. На юге распространены разнотравно-дерновинно-злаковые степи на обыкновенных черноземах. Для рельефа характерно преобладание низменных равнин, а на севере и востоке – возвышенная равнина. Средние высоты колеблются в основном от 150 до 350 м. Средние уклоны бассейнов небольшие и составляют 1.9°. Более крутые бассейны расположены на севере и в центральной части, здесь уклоны лежат в интервале 2-5°. Почвообразующие породы глинистые и суглинистые. По правому склону бассейна реки Самары в районе Бузулука встречаются породы песчаного состава. Средняя годовая температура увеличивается с севера на юг с +4 до +6°С. Среднее годовое количество осадков 391 мм. На осадки теплого периода приходится до 70%. Годовой слой водного стока рек закономерно уменьшается с севера на юг от 150-100 мм до 50 мм. Массивы лесов хорошо сохранились на крутых склонах бассейнов в северной части региона, здесь леса могут занимать от 20 до 40%. Максимальная лесистость характерна для бассейнов в окрестностях Бузулука, где она может быть более 60%. Для степных ландшафтов характерна высокая доля лугов, расположенных в нижних частях склонов бассейнов. В среднем на луга приходится около 40% площади. Доля пашни в среднем также составляет 40%.

Картографирование современной овражной эрозии проведено методом визуального дешифрирования космических снимков высокого и

© Медведева Р.А., Ермолаев О.П., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 22-17-00025).

сверхвысокого разрешения за 2015-2022 гг., которые были предоставлены ресурсами «Google», «Bing». Для определения овражных форм по космическим снимкам была сформирована система дешифровочных признаков. При дешифрировании и последующем картографировании овраги подразделялись по происхождению на первичные (склоновые и береговые) и вторичные (донные) овраги.

В качестве операционно-территориальных единиц взяты бассейны малых рек (всего 246) со средней площадью 90 км^2 . Для каждого бассейна вычислены: суммарная протяженность овражной сети, степень овражного расчленения территории, которая определялась по наиболее часто используемым показателям (густоте и плотности оврагов).

На территории исследования идентифицировано 1681 оврагов (включая их отвершки), средняя длина которых – 85 м, а общая длина овражной сети – 146 км. Из всех овражных форм преобладающее большинство относится к склоновому типу – 77%. На береговые овраги приходится 11%, на донные – 12%. Густота овражной сети в среднем составляет 9 м/км^2 , достигая максимума в 294 м/км^2 . Среднее значение плотности оврагов 0.1 ед/км^2 , максимум 4.2 ед/км^2 .

В регионе проявление овражной эрозии заметно ослабевает в южном направлении. Сильное и очень сильное ($50\text{-}300 \text{ м/км}^2$) овражное расчленение компактными ареалами наблюдается в пределах лесостепной зоны. На большей части исследуемой территории степной зоны овражное расчленение характеризуется как слабое или полное его отсутствие. Заметно выделяется район с полным отсутствием оврагов в лесостепной зоне на севере области в долине реки Мочегай. На этой территории преобладает лесная растительность. Обратная связь распространения лесов и оврагов прослеживается повсеместно. Бассейны малых рек с овражным расчленением от умеренного до очень сильного составляют всего 11% от общего числа речных бассейнов, подлежащих изучению. Преобладающая часть района изучения характеризуется слабым и очень слабым (до 20 м/км^2) овражным расчленением, либо полным его отсутствием.

Эти результаты согласуются с ранее полученными данными по овражности в Татарстане, Чувашии, Ульяновской и Саратовской областях, однако, был выявлен ряд особенностей, характерный для овражной сети Оренбургской области: овражная сеть по территории распределена более равномерно; средняя длина оврагов выше; процент донных оврагов (вторичных врезов) значительно выше. Увеличение средней длины оврагов в Оренбургской области по сравнению с ранее изученными регионами как раз и связано с увеличением количества донных овражных форм, так как средняя длина донных оврагов (123 м)

на 33 м превышает этот параметр у склоновых оврагов. Возможными причинами разного соотношения типов овражных форм могут быть длина склонов, уклоны и конфигурация водосборного бассейна оврага. На длинных склонах образуются овраги значительной длины, с узкими вытянутыми водосборными бассейнами. Сток концентрируется в основном теле оврага, порождая вторичную эрозию, в результате которой образуются донные овраги.

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

Э.И. Михневич

Белорусский национальный технический университет

БАЛАНС НАНОСОВ В ОТРЕГУЛИРОВАННОМ РУСЛЕ р. ОРЕССЫ

Река Оресса является водоприемником для мелиоративных систем, расположенных в долине реки и вдоль ее притоков. Для повышения пропускной способности русло реки отрегулировано путем спрямления и углубления. На значительной длине русла сохранены плавные симметричные повороты, а на участке длиной 16 км русло преобразовано в прямолинейный канал (Фастовичское спрямление).

Для определения количественного соотношения между основными факторами, вызывающими заиление русла, нами изучены деформации русла за двадцатилетний период после его реконструкции и проведен анализ баланса наносов на участке протяженностью 76 км от створа Любанского водохранилища до устья реки. На всем этом участке была произведена съемка (с участием Белгипроводхоза) поперечных сечений русла через 200 м и сделано сравнение их параметров с параметрами сечений, которые были засняты непосредственно после реконструкции реки-водоприемника. Одновременно в контрольных створах измеряли гидравлические характеристики потока (скорости, уклоны поверхности воды). Русло реки рассчитано на пропуск максимальных расходов весеннего половодья 25 %-й обеспеченности. В створе Любань этот расход составляет $Q = 34,1 \text{ м}^3/\text{с}$, а в створе Анд-

реевка – устье реки: $Q = 116 \text{ м}^3/\text{с}$. На всем протяжении русло прорезают легкоразмываемые мелко- и среднезернистые грунты со средним диаметром $d = 0,12-0,30 \text{ мм}$. Средний уклон водной поверхности $I = 0,00010-0,00015$. Средняя скорость $v = 0,5-0,7 \text{ м/с}$ в период половодья и $v = 0,35-0,45 \text{ м/с}$ в меженный период. Максимальная глубина русла $H = 3,5-4,2 \text{ м}$.

Анализ сравнительных данных показал, что русло в основном находится в стадии динамического равновесия. Русловые процессы наиболее интенсивно протекали в первые годы после углубления реки и в настоящее время существенных изменений параметров русла не вызывают. Наиболее неустойчивы участки на поворотах русла, проходящие через мелкозернистые песчаные грунты. Значительным деформациям размыва на глубину $0,6-0,8 \text{ м}$ подвергся участок в нижнем бьефе водохранилища протяженностью около 1 км . Ниже этого участка откосы разрушались преимущественно фильтрационным потоком (высота выщипывания грунтовых вод $h_v = 0,3-0,5 \text{ м}$, в отдельных местах до $1-1,2 \text{ м}$). Наносы по мере удаления от створа все в большем объеме осаждались на дне. Ниже зоны влияния Любанского водохранилища русло р. Орессы за 20 лет эксплуатации заилилось в среднем на глубину $0,6-0,8 \text{ м}$, в отдельных местах на $1-1,2 \text{ м}$.

Более устойчивыми к размыву оказались те участки реки, на которых верхняя часть откосов сложена торфом на значительную глубину ($0,5-1 \text{ м}$). Торф обладает большей устойчивостью к размыву по сравнению с песчаным грунтом. Кроме того, он способствует интенсивному зарастанию откосов и созданию защитного дернового покрова, способного предохранять их от водной и ветровой эрозии.

Фастовичское спрямление (ПК 160...310) находится в устойчивом состоянии, заиление дна сравнительно невелико ($0,3-0,4 \text{ м}$), скорости на этом участке русла ($v = 0,60-0,7 \text{ м/с}$) превышают минимально допускаемые на заиление ($v = 0,40-0,45 \text{ м/с}$). В неудовлетворительном состоянии находится участок на пикетах ПК 350...470: откосы размывы и обрушены примерно на половине протяженности участка. Особенно сильное уширение и обмеление русла наблюдается на участке длиной 3 км у д. Калиновка. Здесь оно заилилось по сравнению с проектным в среднем на $1-1,2 \text{ м}$ и в настоящее время имеет отметки, примерно соответствующие отметкам дна в начале строительных работ по реконструкции русла. На основании детального изучения устойчивости этого участка (ПК 350...470) и проведения расчетов по нашим морфометрическим зависимостям установлено, что в связи с большой глубиной выполненного сечения ($H = 4,3-4,8 \text{ м}$, средняя глубина $H_c = \omega / B = 3,2 \text{ м}$) и относительно малой шириной русла по верху

($B = 36,5 \dots 39$ м) происходил интенсивный размыв откосов с обрушением в русло больших масс песка, из которых в русле сформировались гряды и подвижные побочни. Сечения русла на рассматриваемом неустойчивом участке имеют среднюю ширину русла по верху $B = 41$ м, среднюю из максимальных глубин $H = 3,68$ м, среднюю глубину $H_c = \omega / B = 2,66$ м. Концентрация взвешенных наносов в русле реки ниже впадения магистральных каналов мелиоративных систем составляет $50-100 \text{ г/м}^3$, достигая в весенний период 150 г/м^3 .

Анализ баланса наносов показал, что площади поперечных сечений реки-водоприемника уменьшились за период ее эксплуатации в среднем на 20 %. Расчетами по нашим морфометрическим зависимостям, отражающим закономерности развития процесса деформации в руслах подобного типа, удалось выделить то количество наносов, которое отложилось на дне в результате размыва откосов потоком. Это количество составляет примерно 55-60 % от общего объема заиления реки. Поэтому только применение более совершенной методики расчета параметров устойчивого русла может быть более чем наполовину уменьшить объемы работ по очистке русел от наносов. Остальная часть наносов поступает в реку с выше расположенного участка, а также в результате водной склоновой и ветровой эрозии. В связи с заилением русла отметки уровней пропуска расхода 25 %-й обеспеченности увеличились в р. Орессе примерно на 0,45 м.

Капитальный ремонт, направленный на значительное (до 0,8-1,2 м) углубление, привел бы к нарушению его динамической устойчивости и дал бы некоторый положительный эффект только в первые 1-3 года эксплуатации. Более целесообразно на участках реки, где имеет место подтопление мелиоративных систем и прилегающей территории, предусмотреть создание полейдров.

А.Г. Нарожняя, М.Е. Родионова, В.В. Половинко
*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

СОЗДАНИЕ КАРТЫ ЭРОЗИОННО ОПАСНЫХ ЗЕМЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

Важным этапом при создании адаптивно-ландшафтных систем земледелия является агроэкологическая оценка и комплексные карты, на которых могут быть выделены в автоматическом / полуавтоматическом режиме однородные территории. Одной из таких карт является карта категорий эрозионно опасных земель, которая составляется на основе цифровой модели рельефа и полевых обследований почв (также могут быть использованы почвенные карты хозяйств).

Основными показателями, определяющими различие земель по потенциальной опасности развития процессов эрозии, являются: крутизна склонов, длина, форма и экспозиция склонов, гранулометрический состав почв, эродированность и противоэрозионная устойчивость. Для осуществления оверлейных операций в ГИС обеспечивают хранение указанных данных в едином векторном формате. Для этого данные о рельефе и потенциальной эрозии (устанавливается на основе использования уравнений потенциальной эрозии) классифицируют согласно указанным характеристикам и конвертируют в вектор. Операция «пересечения» в геоинформационных программах обеспечивает соединение данных в один слой, выборки по которому позволяют присвоить территории одну из 9 категорий, объединенных в 4 группы (Григорьев, 1996):

А. Земли, пригодные для интенсивного использования в земледелии:

I категория. Земли не подвержены водной эрозии (несмытые почвы), расположенные на водоразделах и приводораздельных склонах крутизной до 1°. Длина линии стока составляет 300-400 м. Потенциальная интенсивность смыва почвы не превышает 3 т/га в год.

II категория. Земли подверженные слабой эрозии (несмытые и слабосмытые почвы). Верхние пологие участки склонов крутизной до 3°. Длина линии стока не превышает 400-600 м. Потенциальная интенсивность смыва почвы 3,1-10,0 т/га в год.

III категория. Земли подверженные водной эрозии (слабосмытые и среднесмытые почвы). Средние и частично верхние части склонов,

крутизной до 5°. Длина линии стока 600-800 м. Потенциальный смыв почвы 10,1-20,0 т/га в год.

Б. Земли, пригодные для ограниченной обработки, непригодные для возделывания пропашных культур:

IV категория. Земли, подверженные сильной эрозии (средне- и сильносмываемые почвы). Средние и частично нижние части склонов крутизной до 8°. Длина линии стока 800-1000 м. Потенциальная интенсивность смыва почвы 20,1 -40,0 т/га в год.

V категория. Земли очень сильно подверженные эрозии (сильно-смываемые почвы). Нижние, примыкающие к бровкам балок, части склонов, крутизной 8-10. Длина линии стока более 1000 м. Потенциальная интенсивность смыва почвы свыше 40 т/га в год.

В. Земли, непригодные для обработки:

I категория. Земли, балок, верхние их части, примыкающие к пашне, крутизной склонов 10-15°. Длина линии стока 1000-1500 м. Травостой изрежен, встречаются промоины. Интенсивность смыва почвы при распашке может достигать 100-150 т/га в год.

II категория. Земли нижних частей склонов балок, крутизной 15-17°.

Длина линии стока 1500-2000 м. Потенциальная интенсивность смыва почвы, при распашке, может достигать 150-200 т/га и более в год. А также в эту категорию земель включаются днища балок, являющиеся местом выноса мелкозема со всей водосборной площади.

Г. Земли, непригодные для использования под сельскохозяйственные угодья:

I категория. Балочные склоны, изрезанные частыми промоинами, крутизной более 8-10°, расположенные между оврагами, глубиной более 10 м, расстояние между оврагами не превышает 150-200 м. Узкие (менее 200-250 м) балки с очень крутыми склонами (более 17-20°), их днища, являющиеся местом стока талых и ливневых вод, подвергаются размыву.

II категория. Овраги, не подлежащие выполаживанию, выходы мела, галечника, каменистые осыпи, пески и др.

Установление категорий эрозионно-опасных земель ведется с учетом вышеизложенных условий по видам угодий и в объеме отдельных массивов или контуров на основе расчетного смыва почв.

В результате подготовительных работ устанавливаются категории эрозионно опасных земель, и определяется интенсивность смыва почвы от талого и ливневого стока на них.

Для территории Вейделевского района Белгородской области были определены категории эрозионной опасности (табл.).

Табл. Категории эрозионной опасности

Категория эрозионной опасности	Площадь	
	га	%
AI	23196	17,2
API	41288	30,5
APII	31536	23,3
BIV	16774	12,4
BV	7062	5,2
VI и VII	3052	2,3
ГI	8520	6,3
Населенные пункты и водоемы	3780	2,8

Таким образом, 71% всей площади района – это земли пригодные для интенсивного использования в земледелии, что благоприятно сказывается на развитии экономики района в области сельского хозяйства.

**И.В. Никонорова, Н.Ф. Петров, Р.Ю. Саяхова, Т.В. Ялуков,
А.А. Ильина, А.Е. Гуменюк**

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова

ПРОГНОЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ НА ПРАВОМ СКЛОНЕ ДОЛИНЫ р. ТРУСИХА в г. ЧЕБОКСАРЫ

Поводом для появления данной статьи стало редко встречающееся геологическое явление, выявленное на Чебоксарском участке Приволжской возвышенности (Токмовского свода) при инженерно-геологических изысканиях для многоэтажного строительства и оценки устойчивости склонов будущего микрорайона (МКР) «Снегири» на правом склоне долины р. Трусиха в г. Чебоксары. До сооружения Чебоксарского залива Трусиха являлась притоком реки Чебоксарки, а ныне она впадает в Чебоксарский залив Чебоксарского водохранилища. Суть явления состоит в близком совпадении векторов (их направлений и величин) трех геометрических характеристик склонового массива, что потребовало учета данного явления при строительном освоении массива. Этими характеристиками являются: 1) направление и уклон поверхности склона ($\alpha_1 = 3,5^\circ$), 2) направление и угол падения слоистости коренных пород массива ($\alpha_2 = 2^\circ$) и 3) ориентировка и средний угол наклона кривой депрессии подземных вод (УПВ, $\alpha_3 = 3,1^\circ$).

Данное явление имеет положительное влияние на инженерно-геологические (ИГ) и гидрогеологические (ГГ) условия массива, особенно с позиций выбора рационального типа фундамента, прогноза подтопления и освоения подземного пространства.

Такие особенности геологических условий на участке правобережья р. Трусихи, южнее Гагаринского моста и западнее Лакреевского парка и «Ярмарки» выявлены по материалам изысканий института «ЧувашГИИЗ» и собственным наблюдениям. В качестве факторов опасных процессов и явлений рассмотрены: 1) с юга, со стороны ул. Гладкова, овраг-балка глубиной до 15 м с постоянным меандрирующим водотоком и с локальными оползнями на правом склоне, 2) с севера, со стороны моста через р. Трусиха, активный техногенный овраг глубиной до 11 м с техногенным водотоком, с крутыми эрозионно-осыпными бортами, действующий не менее 20 лет, и 3) с запада – русло и широкая (до 80 м) заболоченная пойма р. Трусиха. Другой источник опасностей – лессовая толща, просадочные грунты которой залегают с изменчивой мощностью по простирацию склона (с юга на север) от 2-3 м до 7-8 м.

Геоморфологические условия представлены правым пологим делювиальным склоном долины р. Трусихи с отметками 134-86 м. Склон имеет СЗ экспозицию и ограничен с боков двумя склоновыми «оврагами» – южным и северным, а снизу – её поймой с отметками 86-83 м. Современный склон долины р. Трусихи очень пологий (менее $4,0^\circ$), платообразный, аккумулятивный, устойчивый. Занят редколесьем с крупными дубами возрастом более 100 лет. Его коренная основа (поверхность из пород татарского яруса пермской системы) еще положе и в антропогене перекрылась двумя-тремя разновозрастными покровными толщами, в том числе настоящими лессами полярных пустынь, подчеркивая его устойчивость. Палеогеографический анализ такого разреза позволяет предположительно считать возраст денудационной поверхности коренных пород не моложе московского ледникового или 150 тыс. лет, возраст элювия (коры выветривания коренных пород под четвертичным покровом) – скорее микулинский (около 100-80 тыс. лет), возраст лессовых пород – калининский (не моложе 40 тыс. лет), а возраст делювиального покрова – ленинградско-осташковский (не моложе 15 тыс. лет). В данных условиях рельефа можно ожидать в покровных толщах склона скорее эрозионные процессы и просадочные, но не оползневые.

Литолого-стратиграфические особенности и условия развития опасных процессов массива сложены в интервале отметок 13-77 м в основном терригенными породами коренной основы (вятского и севе-

родвинского горизонтов татарского яруса верхней перми) и частично – покровными образованиями. Покровные образования представлены делювиальными суглинками и лессовыми породами. Их мощность вдоль бровки оврага-балки не превышает 2,0 м, а севернее, к техногенному оврагу, достигает 8,0 м и более. С позиций расчета устойчивости все многообразие грунтов участка можно представить в составе пяти инженерно-геологических элементов, среди которых грунты с особенностями основного деформирующегося горизонта не выявлены, а покровные образования оказались вне зоны смещения. Структурно-тектонические условия связаны с восточным крылом синклинального прогиба, где коренные породы залегают (2-3°) согласно со склоном (около 3,5°). Они обеспечивают дренированность массива и благоприятные условия для строительного освоения подземного пространства. Установлено низкое положение УПВ и необычное для склонов его понижение от водораздела к пойме реки с 7,5 м (отм. 124,6 м) до 12,2 м (отм. 90,5 м). Низкий УПВ в массиве можно объяснить его хорошей естественной дренированностью с трех сторон – р. Трусихой и оврагами, благоприятным поверхностным стоком. Проектируемые фундаменты не должны провоцировать подъем УПВ и подтопление территории.

Опасные геологические процессы, в том числе прогнозные, представлены активным техногенным оврагом длиной 250 м, шириной до 20-40 м, глубиной 10-11 м на полого наклонном (до 3-4°) склоне-плато, тремя локальными давними оползнями на правом склоне балки-оврага с постоянным водотоком, донным врезом в верховье этого же оврага. Дополнительный фактор опасностей – плащеобразная лессовая толща с изменчивой мощностью от 2-3 м до 7-8 м по простирацию склона с юга на север, с которой могут быть связаны процессы просадки и оплывины. Расчет устойчивости выполнен методом «прислоненного откоса» по пяти профилям [Петров, 2011; Тихвинский, 1988]. На склонах нет глубоких оползней, но есть локальные оползни скольжения с захватом всего склона, и оползни течения. В данных инженерно-геологических условиях можно прогнозировать локальные одноярусные двух-трехблочные оползни скольжения с головными блоками вращения с глубиной захвата от 4-5 м до 7-8 м, а также оплывины в коре выветривания терригенных пород с глубиной захвата до 1,5-3,0 м.

А.И. Петелько

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук
(Новосильская ЗАГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН)*

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА СНЕГООТЛОЖЕНИЕ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО*

Процессы водной эрозии наносят большой вред сельскому и другим отраслям народного хозяйства. Они разрушают почвенный покров, сокращают площадь пахотных земель, истощают почвенное плодородие, заносят продуктами размыва пойменные угодья, заиливают пруды и другие водоёмы, портят дорожную сеть, усиливают почвенную засуху и ухудшают гидрологический режим территории. Тем самым эрозия почв является основной причиной снижения урожаев сельскохозяйственных культур.

Решения этой проблемы можно достигнуть путём проведения различных мероприятий:

- задержание снега на полях;
- максимальное поглощение талых и ливневых вод на месте их выпадения;
- задержание сточных вод на определённых рубежах и создание условий для их поглощения почвой;
- перевод части сточных вод на неразмывающиеся участки и защита нижележащих полей и участков от смыва, размыва, заноса продуктами эрозии.

Осуществить эти мероприятия можно путем создания противоэрозионного комплекса, который включает в себя организационно-хозяйственные, защитные лесные насаждения, агротехнические, луго-мелиоративные и гидротехнические мероприятия. Среди них важное место отводится лесомелиоративным мероприятиям. На землях опытной станции имеется 779 га лесных насаждений, в т.ч. 307 га имеют искусственное происхождение. Общая лесистость территории в современных границах составляет 15,1% на площади свыше 5000 га. Преоб-

© Петелько А.И., 2023

* Выполнено в рамках гос. задания ФНЦ агроэкологии РАН № FNFE-2022-0012 «Теоретические основы эрозионно-гидрологического процесса на водосборных бассейнах, концептуальные направления, пути и принципы создания высокоэффективных экологических систем управления этим процессом с целью полного предотвращения эрозии почв».

ладающими породами являются: береза, дуб, сосна, лиственница, ель, тополь, липа, клён, ясень и прочие.

ЗЛН оказывают разностороннее мелиоративное влияние не только на занимаемую, но и на прилегающую к ним территорию. Многолетними исследованиями, в т.ч. на Новосильской ЗАГЛОС, установлено, что более эффективным бывает влияние системы ЗЛН в сравнении с единично расположенными лесными полосами.

Многочисленными исследованиями было установлено, что степень ветрозащитного влияния лесных полос зависит их высоты, конструкции, скорости ветра и угла подхода ветрового потока, т.е. полосы ажурных и продуваемых конструкций. Дальность влияния таких полос составляет до 6Н с наветренной стороны и до 20-30Н – с заветренной (Н – защитная высота лесной полосы). На склоновых землях протяжённость эффективного воздействия лесных полос заметно уменьшается. И чем круче, склон, тем меньше дальность влияния. Закономерность в распределении сохраняется и при наличии системы лесных полос, но разница по экспозициям значительно сокращается, особенно в годы с продолжительными метелями.

В районе расположения Новосильской ЗАГЛОС в зимнее время преобладают ветры ЮВ и ЮЗ направлений, во время которых снег сносится с полевых склонов и откладывается на заветренных склонах и берегах гидрографической сети. При этом наиболее интенсивное сдувание снега наблюдается в нижней части ветроударных склонов; по мере приближения к водоразделу и при переходе на заветренные склоны сдувание снега ослабевает. По исследованиям [Харитонов Г.А., 1958], при отсутствии лесных полос запас снеговой воды в нижней части ветроударных склонов к началу снеготаяния составляет 70%, на заветренных склонах -150%, по сравнению с запасами снеговой воды на водоразделе. По наблюдениям [Каргова В.А., 1971], на станции в среднем за 5 лет, высота снега на ветроударном склоне с системой узких снегораспределительных лесных полос составила 39,3 см, на заветренном – 50,4 см с соответствующими снегозапасами воды 130 и 167 мм, а на склонах таких же экспозиций без лесных полос, соответственно – 30,1 и 38,2 см, 95 и 141 мм. Исследования доктора с.-х. наук Е.А. Гаршинова, который долгое время работал на станции, показали, что в среднем за 11 лет наблюдений на склоне юго-западной экспозиции в системе продуваемых лесополос высота снега составила 50 см, на склоне юго-восточной – 38 см, без лесных полос, соответственно, 37 и 19 см. Иными словами, система ЗЛН на ветроударных склонах по снегораспределению показывает как он превращает их в заветренные.

Береговые насаждения имеют небольшую дальность влияния на снегоотложение на полевых склонах. Это обусловлено двумя факторами: во-первых, они обычно имеют плотную конструкцию, во-вторых, как правило, ближе к бровке берега крутизна склона увеличивается. Материалы наблюдений за 10 лет на опытной станции свидетельствуют о том, что на маршруте, проходящем по склону северо-западной экспозиции через такое насаждение, в зоне до 60 м (5Н) заметно увеличение толщины снежного покрова. Невелика и дальность влияния береговых насаждений на ветроударных склонах (см. табл.).

Таблица. Высота снега (в см) на различном удалении от опушки и внутри березового насаждения [Е.А. Гаршинев, Н.Е. Новиков].

Годы наблюдений	Полевая часть							Березовые насаждения			
	Расстояние от опушки леса, м										
	140-150	120-140	100-120	80-100	60-80	40-60	20-40	0-20	0-20	20-40	40-60
1	52	51	50	56	54	59	69	85	82	59	74
2	18	18	17	25	22	22	31	64	78	44	40
3	21	24	24	20	23	27	27	27	37	25	27
4	56	50	50	48	48	63	78	104	122	46	70
5	78	64	70	72	68	73	90	107	105	66	78
6	18	17	21	25	26	32	41	60	66	31	38
7	49	44	39	40	39	46	59	75	78	46	56
8	21	20	21	21	21	23	30	36	33	27	26
9	3	7	8	10	10	15	19	22	36	18	20
10	26	29	29	29	29	32	36	36	44	31	32
Среднее	34.3	32.4	32.9	34.6	33.1	39.2	48.0	61.6	68.1	39.3	46.1

Наиболее интенсивно сдувается снег на берегах гидрографической сети. Весьма показательным в этом плане является описание снегоотложения в зиму 1923-24 гг., сделанное А.С. Козменко в годовом отчете за 1924 год, когда на территории станции ещё отсутствовали насаждения: "Правые берега Одинокского и Глубковского суходолов (южная и юго-восточная экспозиции), несмотря на обилие выпавших зимних осадков весьма тонкий слой снежного покрова, а во многих местах явились и совершенно свободными от него, в то время как берега северо-восточных северных и северо-западных экспозиций явились пунктами скопления громадных наносов снега, достигавших толщины трех и более саженей."

На Новосильской ЗАГЛОС создана законченная система защитных лесных насаждений, выявлен и апробирован ассортимент древесных и кустарниковых пород для насаждений на эродированных землях [Новиков, Петелько, Селиверстов, 2000].

Таким образом, мелиоративная роль противоэрозионных насаждений является неотъемлемым элементом защиты почв от водной эрозии. Без лесных насаждений невозможно строить эффективную систему почвозащитного комплекса в адаптивно-ландшафтном земледелии. Повышение плодородия почвы – это неперемнное условие дальнейшего прогресса развития сельскохозяйственного производства.

А.И. Петелько

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук
(Новосильская ЗАГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН)*

ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ЭРОДИРОВАННЫХ ПОЧВАХ*

Защита почв от водной эрозии – это важнейшая задача. Земли Центрального района России в границах Среднерусской возвышенности относятся к числу эродированных. Это связано как с природными условиями, так и с антропогенной деятельностью человека. Около 60% территорий региона имеют уклон $0,05^\circ$, а коэффициент территории древней гидрографической сетью колеблется от 0,8 до 1,4 км/км². По выражению основателя Новосильской ЗАГЛОС А.С. Козменко, эрозия почв – это болезнь земли. Вред, причиняемый эрозией, заключается в том, что при прохождении стока талых и ливневых вод происходит смыв и размыв почв, истощается почвенное плодородие, что приводит к снижению урожаев сельскохозяйственных культур, заиливаются реки, пруды, водоёмы. Пагубное воздействие эрозии усиливается из-за неправильного использования склоновых земель, т.е. не соблюдаются противоэрозионные мероприятия. Но её можно предотвратить при проведении почвозащитного комплекса, который разработан учёными Новосильской опытной станции. В настоящее время по разным причинам в хозяйствах происходит снижение запасов гумуса в почве.

© Петелько А.И., 2023

* Выполнено в рамках гос. задания ФНЦ агроэкологии РАН № FNFE-2022-0012 «Теоретические основы эрозионно-гидрологического процесса на водосборных бассейнах, концептуальные направления, пути и принципы создания высокоэффективных экологических систем управления этим процессом с целью полного предотвращения эрозии почв».

В опытном хозяйстве станции на мелиорированных участках произошло увеличение содержания гумуса на 1,5%.

В системе агротехнических мер важная роль принадлежит удобрениям. Научными учреждениями установлена и практикой передового опыта подтверждена эффективность минеральных удобрений на смытых почвах. Эффект от их применения возрастает с увеличением степени смытости. Дерново-подзолистые и серые лесные почвы имеют очень низкие запасы гумуса и содержание азота, потому применение на них азотных удобрений способствует значительному увеличению урожайности. Действие фосфорных и калийных удобрений проявляется слабо из-за недостатка азота. В опытном хозяйстве Новосильской ЗАГЛОС внесение 45 кг. д.в. азота на гектар способствовало повышению урожайности овса на среднесмытых серых лесных почвах на 4,3 ц/га, ячменя – 1,7-3,3 ц/га, а на сильносмытых, соответственно, 12,1 и 2,6-9,9 ц/га. Во влажные годы действие удобрений проявляется сильнее. При внесении 60 кг д. в. азота на гектар средняя за 4 года прибавка урожая яровых культур составила на среднесмытых почвах 4,0, на сильносмытых – 10,5 ц/га. Средние прибавки урожая от 90 кг д.в./га. были несколько ниже, чем при внесении 60 кг д.в./га и выразились такими показателями: на среднесмытых – 4,3 ц/га, на сильносмытых – 8,2 ц/га. Прибавка зерна на 1 ц д.в. азота снизилась на среднесмытых почвах в 1,5 раза, на сильносмытых – в 1,3 раза. Увеличение доз азота до 120 кг д.в. на гектар не способствует увеличению прибавок, чаще снижает их. Причём на участках, где вносятся большие дозы азотных удобрений, образуется большая вегетативная масса, что приводит к полеганию посевов, неравномерности их созревания, ухудшению качества зерна, затрудняется уборка, что ведёт к большим потерям зерна. При применении 45 и 60 кг д.в. азота на гектар полегание посевов не отмечалось даже во влажные годы. При использовании азотных удобрений следует учитывать, что азот в почве накапливается в доступной для растений форме. Применение больших доз азотных удобрений может привести к потерям азота. Стабильные и высокие прибавки урожая яровых культур обеспечивает применение азотно-фосфорных удобрений и полного минерального удобрения. Азотно-фосфорные удобрения дают наибольший эффект на почвах с низкой обеспеченностью фосфором, которая чаще наблюдается у оподзоленных черноземов. Внесение 45-60 кг д.в. азота с базов 30-40 кг д.в. фосфора на гектар повышает урожайность яровых зерновых в среднем на 6-15 ц/га на

сильносмытых почвах и на 4-7 ц/га на среднесмытых. Применение полного минерального удобрения способствует получению высоких прибавок урожая (до 8-18 ц/га), на которых в меньшей степени проявляется действие неблагоприятных погодных условий. При использовании 60-90 кг д.в. азота в полном минеральном удобрении полегание посевов не наблюдается, а при 120 кг д.в. азота – во влажные годы, имеет место полегание посевов в период колошения, что приводит к нарушению нормальных условий для дальнейшего развития зерновых культур. Применение высоких доз не только азотных, но и полного минерального удобрения нецелесообразно и экономически не выгодно.

При использовании минеральных удобрений на эродированных почвах необходимо учитывать и то, что фосфорные удобрения сильно закрепляются почвой, переходя в труднорастворимые фосфаты кальция. С увеличением степени смытости поглощение усиливается. На смытых почвах с низкой обеспеченностью фосфором фосфорные удобрения следует вносить незадолго до посева, лучше весной под предпосевную культивацию или при посеве в рядки. В этом случае удобрения будут соприкасаться с меньшим объёмом почвы, что уменьшает их закрепление.

Калийные удобрения в основном имеют кислую реакцию. На сильносмытых почвах внесение калийного удобрения без известкования недопустимо. На кислых почвах весьма эффективно применение калийных удобрений с фосфоритной мукой. В этом случае удобрения вносят под основную обработку. При взаимодействии с почвой калий переходит в обменную форму и доступность его для растений не снижается [Петелько А.И., Петелько Н.Е., 1984, 1985, 1987, Петелько А.И., 2012]. Минеральные удобрения на смытых почвах позволяют в течение нескольких лет поддерживать плодородие и получать высокие урожаи зерновых культур.

А.И. Петелько, А.Т. Барабанов, А.В. Выпова
*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук
(Новосильская ЗАГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН)*

ЭЛЕМЕНТЫ ВОДНОГО БАЛАНСА НА РАЗНЫХ ВАРИАНТАХ В ЛЕСОСТЕПИ*

Водная эрозия почв наносит большой вред сельскохозяйственному производству. На склоновых землях необходимо применять комплекс противоэрозионных мероприятий, который разработан и внедрен на землях Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции. Основой почвозащитного комплекса являются защитные лесные насаждения. Они улучшают микроклимат полей, задерживают и распределяют снег, влияют на глубину промерзания почвы, сокращают сток и смыл почвы, что способствует сохранению почвенного плодородия, улучшению экологической обстановки и увеличению урожайности сельскохозяйственных культур.

Научные сотрудники опытной станции перешли на закладку стационарных многолетних и многофакторных опытов по противоэрозионной тематике, что позволяет получать наиболее полную и объективную оценку природных факторов [1,2,3,4]. Многолетний стационарный опыт со стоковыми площадками заложен в деревне Одинок Новосильского района Орловской области в опытном хозяйстве Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции – филиале Федерального научного центра агроэкологии Российской академии наук на склоне юго-западной экспозиции. Крутизна склона 3–4°. На участке почвы серые лесные, средне- и смытые, смытость увеличивается сверху вниз по склону. На многофакторном опыте в нижней части склона размещена 4-х рядная лесная полоса 1960 года посадки. Схема посадки Б-Т-Т-Б, размещение 2,5 x 1 м. Возле лесополосы проведена посадка низкорослого кустарника из спиреи. Согласно программе и методике научные исследования проводились под руководством главного научного сотрудника, зав. лабораторией защиты почв от эрозии, доктора сельскохозяйственных наук А.Т. Барабанова. Цель научных исследований – изучить закономерности снегоотложения в комбинированной стокорегулирующей лесной полосе с низкорослым кустарником, предотвращение глубокого промерзания почвы и формирования поверх-

© Петелько А.И., Барабанов А.Т., Выпова А.В., 2023

* Выполнено в рамках гос. задания ФНЦ агроэкологии РАН № FNFE-2022-0012 «Теоретические основы эрозионно-гидрологического процесса на водосборных бассейнах, концептуальные направления, пути и принципы создания высокоэффективных экологических систем управления этим процессом с целью полного предотвращения эрозии почв».

ностного стока талых вод. Научное направление исследований проводится впервые и является актуальным.

Наблюдениями установлено, что при неглубоком промерзании почвы (до 50 см) поверхностного стока не бывает. За четыре года наблюдений промерзание почвы перед снеготаянием было слабым, что способствовало постепенному просачиванию всей талой воды в почву. Зная закономерности снеготаяния, можно управлять эрозийно-гидрологическим процессом. Водопоглощение на контрольных вариантах без лесной стокорегулирующей полосы было 34-110 мм, а на других агрофонах зяблевой вспашки и озимых со стокорегулирующей лесополосой и низкорослым кустарником значительно выше – от 47 до 125 мм. Определялись главные природные факторы и их влияние на формирование стока талых вод.

Материалы и методика научных исследований. На опыте в лесной стокорегулирующей полосе комбинированной конструкции были проведены посадки низкорослого кустарника спиреи японской Фробели (*spirea japonica Froebeli*). Схема опыта на стоковых площадках:

1. Поле зяби без лесной полосы (контроль).
2. Поле зяби + низкорослый кустарник по верхней опушке.
3. Поле зяби + низкорослый кустарник по нижней опушке.
4. Поле зяби + низкорослый кустарник по верхней и нижней опушкам.

Примечание. В 2019, 2020, 2022 годах на стоковых площадках агрофоном была зяблевая вспашка поперек склона, а в 2021 г. – посев озимой пшеницы.

По программе изучали снеготаяние, промерзание, влажность и оттаивание почвы, формирование поверхностного стока талых вод.

Перед снеготаянием на стоковых площадках измеряли высоту снежного покрова по двум снегомерным ходам через 2-4 м в 3-5 кратной повторности. Плотность снега определяли весовым снегомером ВС-43 на каждой стоковой площадке в 6-ти точках в 2-х кратной повторности. Глубину промерзания почвы учитывали по наличию кристаллов льда при бурении. Образцы почвы на влажность отбирали в 3-х кратной повторности со следующих глубин: 0-3, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 см. Применяли термостатно-весовой метод. В период снеготаяния наблюдения за оттаиванием почвы проводили при помощи металлической шпильки в 5-ти кратной повторности в верхней, средней и нижней частях

Материалы исследований выявили влияние главных природных факторов на формирование стока талых вод, что даёт возможность разработать новые приёмы регулирования снеготаяния в комбинированной стокорегулирующей лесной полосе с низкорослым кустарником.

К.Н. Прокопьева, С.Р. Чалов

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

РАЗРУШЕНИЕ БЕРЕГОВ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ: ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ*

Активизация русловых деформаций обуславливает трансформацию стока наносов. Насыщенные льдом отложения многолетнемерзлых пород подвержены термоэрозионным и термоденудационным процессам, что приводит к их чувствительности к глобальному повышению температуры воздуха в Арктическом регионе. Такие процессы ярко выражены к крупнейшей арктической дельте – дельте р. Лена.

Нами выполнен анализ размывов берегов в дельте Лены на основе сопоставления двух спутниковых снимков Landsat с пространственным разрешением 30 м. Первый снимок был получен со спутника Landsat-7 27 июня 2000 года при расходе воды на г.п. Кюсюр $37\,900\text{ м}^3/\text{с}$, второй снимок Landsat-8 от 17 июня 2021 года при расходе воды на г/п Кюсюр равном $38\,200\text{ м}^3/\text{с}$. Спутниковыми снимками полностью охвачена центральная часть дельты, участки Оленекской и Быковской проток. Большая часть Трофимовской и Туматской проток также охвачены спутниковыми наблюдениями, однако северная часть дельты площадью $3,3\text{ км}^2$ не охвачена измерениями в виду локальной облачности на снимке от 2021 года.

В основе методики лежит классификация спутниковых снимков методом наибольшего подобия. Для этого использовался встороненный инструмент геоинформационной системы *ArcGIS Maximum Likelihood Classification*, который выполняет классификацию по методу максимального подобия для набора каналов растра и создаёт классифицированный растр в качестве выходных данных. На основе полученных в ходе классификации двух снимков участков размыва, составлена сетка размером 5 км на 5 км, покрывающая 30 тыс. км^2 дельты. Интенсивность размыва рассчитывалась в относительных единицах как отношение площади размыва к площади речного русла.

Общая площадь размыва на участке 30 тыс. км^2 дельты (площадь русла – $6,63\text{ тыс. км}^2$) составила $65,6\text{ км}^2$, то есть в год на рассматриваемом участке дельты Лены в среднем размывается около $3,13\text{ км}^2$

© Прокопьева К.Н., Чалов С.Р., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 21-17-00181 – анализ спутниковых снимков) и по госзаданию научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051100166-4 – разработка алгоритма классификации снимков).

площади островов дельты. Расчёты приведены без учета участка, не охваченного измерениями, площадь которого составляет 3,3 тыс. км² (менее 10% от общей площади дельты).

Интенсивность размыва изменяется на разных участках русла и частях дельты. Наименьшие значения до 5% от площади русла характерны для большей части дельты площадью 12,8 тыс. км². Экстремальные значения интенсивности размыва выявлены на отдельных участках. В частности, до 15 % русла подвержено переформированиям в нижних частях рукавов Трофимовской и Оленекской протоки. Увеличение интенсивности размыва наблюдается также на участке Трофимовской протоки, где на 6-километровом отрезке у о. Собо-Сисё площадь размыва составила 0,58 км² за 20 лет. В среднем это соответствует средней интенсивности отступания берега 4,74 м/год и максимальной величине отступания – до 15 м/год. Интенсивность горизонтальных деформаций увеличивается на участках крупных обнажений многолетнемерзлых пород, приуроченных к ледовым комплексам, которые помимо Трофимовской протоки распространены и в Оленекской протоке. Увеличение интенсивности прослеживается у о. Курунгнах – в истоке Оленекской протоки.

Максимальная площадь размыва характерна для средней части Трофимовской протоки и для участков, где воздействие морских вод и абразионных процессов максимально. Значительно меньше площади размыва на участках Быковской протоки. Особенностью Быковской протоки является полное отсутствие участков размыва, что обусловлено геоморфологическим строением дельты – правый берег дельты представляет собой неразмываемый коренной берег Хараулахского хребта, а характерной чертой левобережной части Быковской протоки являются малые глубины, где размывающая способность потока минимальна. Небольшой участок размыва расположен в центральной части дельты и приурочен он к надпойменной террасе, к которой не примыкают участки низкой поймы, сложенной песчаными аллювиальными отложениями. Однако на нижнем 30-километровом участке до впадения в залив Неёлова наблюдаются обширные участки размыва островов Быковской протоки, образование которых связано с абразионным воздействием со стороны моря.

В целом, интенсивности размыва на обширном участке дельты Лены отличаются как для отдельных протоков дельты, так и по длине главных рукавов. Минимальны интенсивности размыва в истоке Быковской протоки и на участках возле острова Арга-Муора Сисэ, где отсутствуют даже временные водотоки из-за отличий происхождения этого острова по сравнению с самой дельтой, а максимальны – в устье

Трофимовской. Отмечается повышение площадей размыва на участках нижнего течения рукавов, где увеличивается воздействие абразионных процессов. Данная закономерность сохраняется для всех секторов дельты. Занижено значение площади размыва для нижних частей Туматской и Трофимовской протоков, что связано с облачностью на спутниковом снимке на территории нижнего течения северной части дельты.

И.И. Рысин, И.И. Григорьев, М.А. Пермяков
Удмуртский государственный университет

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ НА ТЕРРИТОРИИ УДМУРТИИ*

Здесь впервые представлены результаты длительных (1978-2022 гг.) полевых наблюдений за линейным ростом оврагов в пределах юга Вятско-Камского междуречья на территории Удмуртской Республики (УР). На 2022 г. в систему мониторинга на землях сельскохозяйственного назначения входят 168 вершин оврагов, которые располагаются на 28 ключевых участках.

Обобщенный график среднегодовых темпов линейного прироста агрогенных оврагов получен на основе использования данных по всем оврагам, включенным в систему мониторинга. За весь период наблюдений на фоне общего нисходящего тренда отчетливо выделяются 4 пика с максимальными значениями, которые все относятся к первому этапу наблюдений 1978-1997 годы: 1979 г. (2,8 м/год), 1990 и 1991 гг. (1,9 и 2,3 м/год) и в 1994 г. (1,8 м/год). Усиление темпов отступления вершин оврагов в эти годы было обусловлено интенсивностью половодного стока и значительной долей пашни на их водосборах. После 1996 г. среднегодовые темпы отступления вершин оврагов резко уменьшились и только в 1997, 1998 и 2001 гг. превышали значение 0,5 м/год, достигнув минимума в 2008 г. При этом более активным ростом характеризуются вторичные овраги.

Анализ представленных на графике данных свидетельствует о большом диапазоне средних скоростей линейного роста отдельных групп оврагов за последние 44 года. Наибольшие различия наблюдаются среди первичных оврагов, что легко объяснить, так как каждый из оврагов данного типа может находиться на разных стадиях своего развития. Средние многолетние темпы линейного роста по всем первич-

© Рысин И.И., Григорьев И.И., Пермяков М.А., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 23-27-00194).

ным оврагам за анализируемый период оказались невысокими – 0,59 м/год, чуть выше эти показатели у вторичных оврагов – 0,74 м/год (табл. 1). Сокращение темпов прироста первичных оврагов по типам отличаются незначительно – от 5,5 до 6 раз, а у вторичных оврагов различия более существенные – от 2,6 раз у донных, до 21,1 раза у пойменного оврага (табл. 1).

Среди первичных наиболее интенсивно развиваются приводораздельные (склоновые) овраги, их средняя многолетняя скорость за рассматриваемый период составляет 0,82 м. Максимальная скорость отмечена в 1985 г. у с. Мушак Киясовского района и составила 80,30 м, второй максимум был зарегистрирован в 2001 г. (21,80 м) у оврага, растущего в пределах села Крымская Слудка на левобережье р. Вятка. Средние многолетние скорости прибалочных (0,54 м) и придолинных (0,40 м) оврагов намного меньше (табл. 1). Существенно ниже у данных типов и максимальные скорости: у придолинных, соответственно 18,80 м (2002 г.), а у прибалочных – 5,10 м (1999 г.).

Таблица 1. Средние многолетние скорости роста различных типов оврагов УР (м/год)

Типы оврагов*	Количество, единиц	1978-1997 гг.	1998-2022 гг.	Сокращение темпов, количество раз	1978-2022 гг.
Первичные овраги					
ПБ	16	1,04	0,19	5,47	0,54
ПВ	52	1,56	0,26	6,00	0,82
ПД	31	0,77	0,13	5,92	0,40
Вторичные овраги					
В	43	1,28	0,25	5,12	0,65
Д	25	1,38	0,53	2,60	0,90
П	1	1,69	0,08	21,13	0,68

*Типы оврагов: ПБ – прибалочные, ПВ – приводораздельные, ПД – придолинные, В – вершинные, Д – донные, П – пойменный

Вторичные овраги развиваются более активно, чем первичные. Если средние многолетние скорости у донных оврагов выше, чем у вершинных и пойменных, то по максимальным скоростям наиболее высокие показатели у вершинного оврага (84,58 м) были зарегистрированы в 1979 г. на ключевом участке у с. Варзи-Ятчи Алнашского района. Второй максимум был отмечен в 2001 г. у оврага близ д. Фертики Воткинского района и составил 18,10 м. Для донных оврагов максимум (13,80 м) был отмечен в 2001 г. у д. Курегово Малопургинского района. Для пойменного оврага максимальная величина годового прироста зафиксирована в 1991 г. и составила 2,64 м. Следует учесть, что с

2008 года мы ведем наблюдения над новым пойменным оврагом, возникшим на высокой левобережной пойме р. Варзинка у д. Юмьяшур Алнашского района. Овраг развивается вследствие частых прорывов земляной дамбы в устье балки, созданной для накопления талых вод для водопоя скота летом. Так, в первый год прорыва земляной запруды в 2007 году он вырос на 53 м. Второй максимум прироста был зарегистрирован на следующий 2008 г. (38 м), что было связано с повторным прорывом дамбы.

Климатические условия, характер землепользования, литолого-геоморфологическое строение территории, глубины местных базисов эрозии, морфометрические характеристики склонов и их экспозиция, а также величины водосборной площади, ширина и глубина оврага при вершине являются одними из наиболее важных характеристик, влияющих на процессы овражной эрозии.

И.И. Рысин, Л.Н. Петухова, Я.А. Кудрявцев
Удмуртский государственный университет

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РУСЛОВЫХ РАЗМЫВОВ НА РЕКАХ УДМУРТИИ*

С целью исследования особенностей развития горизонтальных русловых деформаций на территории Удмуртской Республики (УР) по крупномасштабным топографическим картам нами было выделено 55 ключевых участков, охватывающих реки разной величины. Полевые работы на изучаемых реках проводятся ежегодно (с 1999 года) в летний период, а на отдельных участках (около г. Ижевска), еще дополнительно весной и осенью. Для определения скоростей размыва на всех ключевых участках было заложено около 300 реперов и марок, а в пределах 30 участков проводится тахеометрическая съемка размываемого берега.

Анализ полученных за двадцать три года (2000-2022 гг.) полевых данных свидетельствует о большом диапазоне скоростей бокового размыва рек. По данным полевых экспедиционных наблюдений наибольшие скорости размыва характерны для рек с порядком выше 9-го (по Шайдеггеру). Максимальные значения размыва, наблюдаемые на таких реках, достигают 6-8 м и более, среднегодовые скорости размыва

© Рысин И.И., Петухова Л.Н., Кудрявцев Я.А., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00194).

ва колеблются в интервале 0,8-3,1 м/год. На р. Вятка, имеющей 15-й порядок, среднегодовые скорости размыва превышают 3-5 м/год, а максимальные из зафиксированных значений составляют 12-15 м/год. Достаточно активно проявляются горизонтальные русловые деформации на р. Чепца у д. Яр (порядок 12,3): среднегодовые скорости размыва здесь составляют обычно 1-3 м/год, а максимальные – 7,1 м были отмечены в 2005 году.

Для малых рек (6-9 порядок) средние скорости отступления берега составляют 0,3-0,5 м/год. Но на отдельных участках размывы намного выше: на р. Кырыкмас (д. Тавзямал) в 2012 году максимальный размыв составил 5,05 м, в 2017 году, соответственно – 5,35 м. На р. Пызеп (д. Бани) в 2012 году максимальный размыв на одном из участков составил 4,8 м, а в 2019 году данный показатель достиг рекордных для данной группы 5,5 м.

Для очень малых рек (порядок ниже 6-го) значения средних скоростей размыва составляет – 0,1-0,3 м/год, хотя в отдельных точках зарегистрировано смещение берега на 1 м и более. Так, на участке реки Шаркан у д. Титово (порядок 5,6) средний максимальный размыв в 2000 и в 2003 годах превысил 2 м. На реке Адамка у с. Грахово (порядок 3,8) средний максимальный размыв в 2011 году составил 4,2 м, а на р. Агрызка у д. Баграш-Бигра (порядок 4,5) максимальный размыв в 2003 году составил 8,1 м, что было вызвано прорывом земляной дамбы расположенного выше пруда.

Статистические показатели средних годовых и максимальных размывов на реперных участках за рассматриваемый период представлены в ниже следующих таблицах (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Статистические показатели по среднегодовым размывам русел рек Удмуртии по реперным данным за период 2000-2022 годы

Порядок реки	M*	N	Me	σ	E	A	Cv
< 6	0,24	256	0,155	0,018	40,68	5,05	1,21
6 -9	0,33	569	0,20	0,017	13,38	3,13	1,21
9-14	0,47	230	0,30	0,029	7,76	2,31	0,96
>14,1	2,13	23	1,4	0,31	0,12	0,97	0,71
Все реки	0,1	1055	0,2	0,016	28,6	4,41	1,41

*Условные обозначения: M – среднее арифметическое, N – количество показателей, Me – медиана, σ – стандартная ошибка, E – эксцесс, A – асимметричность, Cv – коэффициент вариации.

Таблица 2. Статистические показатели по максимальным размывам русел рек Удмуртии по реперным данным за период 2000-2022 годы

Порядок реки	M*	N	Me	σ	E	A	Cv
< 6	0,55	256	0,35	0,049	37,09	4,89	1,42
6-9	0,78	569	0,47	0,038	7,84	2,65	1,17
9-14	1,75	230	0,70	0,081	5,22	2,03	0,70
>14,1	5,14	23	3,05	0,96	-0,16	1,07	0,90
Все реки	0,91	1055	0,5	0,018	36,1	4,89	1,46

*Условные обозначения см. в табл. 1.

Анализ статистических данных показывает, что изменчивость величин размыва берегов рек относительно средней величины варьируется в значительных пределах. Коэффициенты вариации самые низкие у средних и больших рек, что, вероятно, косвенно может указывать на их более высокую размывающую способность по сравнению с малыми водотоками. Значение медианы и среднего арифметического не сильно отличаются друг от друга, при этом медиана во всех случаях меньше среднего, то есть совокупность крайне неоднородна и содержит экстремальные значения. Асимметрия во всех случаях положительна, для большинства рек преобладают высокие значения, что говорит о преобладании значений ниже среднего. Значения асимметрии близкие к единице отмечены только для рек с порядком более 14,1, следовательно, распределение значений размывов здесь мало отличается от нормального. По высоким положительным значениям эксцесса можно узнать, что графики распределения величин размывов по всем группам рек являются островершинными за исключением максимальных размывов на реке с порядком более 14,1 (р. Вятка), здесь этот график – плосковершинный.

Анализ среднегодовых и максимальных размывов (без учета данных тахеометрической съемки) за 23-летний период показал, что в последние годы отмечается тенденция уменьшения величин размыва. В меньшей степени данная тенденция характерна для группы малых рек с порядком 6-9, где отмечается вариация показателей относительно средней величины.

Результаты же тахеометрической съемки показывают обратную картину: величина размывов (линейных, площадных и объемных) имеет положительный тренд. При этом наибольшие размывы для многих рек зарегистрированы в 2012, 2013, 2016 и 2021 годах, когда на них отмечались и наиболее высокие половодья. При этом на р. Кырыкмас в 2021 г. зафиксирована рекордная за весь период наблюдения величина размыва – 8,14 м. Более детальную характеристику размывов, полученную по данным тахеометрической съемки, мы представим в отдельной работе.

А.Ю. Сидорчук

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ФАКТОР РЕЛЬЕФА В УНИВЕРСАЛЬНОМ УРАВНЕНИИ ПОЧВЕННОЙ ЭРОЗИИ*

В 1920-30-е годы в СССР и США практически одновременно началось накопление экспериментальных (лабораторных и полевых) данных об эрозии почв. В конце 30-х – начале 40-х публикуются первые попытки математического описания этого процесса. Две формулы были получены аналитически Я.В. Корневым [1937] и Р. Хортоном [1945] из уравнений гидравлики и поэтому имеют близкую структуру: скорость эрозии пропорциональна произведению длины склона в степени 0.5-0.6 на уклон в степени 0.67-0.75. Эти формулы легко верифицируются (т.е. их физическая основа может быть проанализирована) и при желании в них можно внести необходимые изменения исходя из современных представлений об эрозии. В настоящее время подобный подход реализуется в так называемых физически обоснованных моделях эрозии. Третья формула с близкой структурой была получена А. Зингом [1940] по данным экспериментов по дождеванию эрозионных площадок с разной длиной и уклонами. Формула эмпирическая, скорость эрозии A представлена как произведение некоторого коэффициента k , длины склона L в степени 0.6 и уклона S в степени 1.4:

$$A = kL^{0.6}S^{1.4} \quad (1)$$

Интересно совпадение степени при длине склона с теоретическими формулами. Однако эта формула в таком виде физического смысла не имеет и поэтому не верифицируется, может применяться только для условий экспериментов, использованных и проведенных А. Зингом.

Первые две формулы упоминаются только в обзорных трудах. Другая судьба у формулы А. Зинга [1940] – она вошла в глобально известное и всеми применяемое Универсальное уравнение почвенной эрозии (USLE) Уишмейера-Смита [1965, 1978] в качестве фактора рельефа (LS фактор). Последовательность действий при выводе USLE описана Лафленом и Молденхаузером [2003]. Уже в следующем году после публикации формулы (1) Д. Смит [1941] опубликовал формулу:

© Сидорчук А.Ю., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М. В. Ломоносова (№ 121051100166-4).

$$A = CL^{0.6}S^{1.4}P \quad (2)$$

Формула (2) с помощью фактора P учитывала способы механической обработки поля, а фактора C – влияние растительного покрова на эрозию. Эти факторы определялись вычислением коэффициента k в формуле (1) путем деления измеренной скорости эрозии A на комплекс $L^{0.6}S^{1.4}$ и привязкой полученных величин к способу механической обработки почвы или виду сельскохозяйственных культур. Выбранный Смитом путь получения факторов эрозии путем последовательного вычисления и усложнения коэффициента в предыдущей версии формулы лег в основу методологии получения USLE. Уже довольно скоро [Масгрейв, 1947] таким способом были получены в первом приближении остальные факторы, ныне входящие в USLE: фактор эрозионной способности дождя R (вычисляемый по Масгрейву через максимальную интенсивность дождя за 30 минут I_{30}) и фактор устойчивости почв к размыву K :

$$A = \left(\frac{I_{30}}{1.25} \right)^{1.75} K \left(\frac{L}{72} \right)^{0.35} \left(\frac{S}{10} \right)^{1.35} C \quad (3)$$

Однако такой способ расчета факторов эрозии привел к тому, что какое-либо изменение способа расчета любого из факторов требует пересчета значений всех остальных факторов по данным измерений. Так как уравнения 1-3 эмпирические, то любые попытки расширить сферу их применения приводят к необходимости вносить подобные коррективы. Это видно уже при сравнении формул (2) и (3) – показатели степени при длине склона и уклоне были изменены.

К середине 1950-х годов основной массив наблюдений на эрозионных станциях по всей сельскохозяйственной территории США был собран – около 10000 площадко-лет измерений скоростей эрозии. Для обработки этого огромного и разнородного массива данных было создано специализированное научное подразделение, возглавляемое У. Уишмейером, по образованию статистиком. Уже первые попытки обработки эмпирического материала для 15 станций [Уишмейер и др., 1958] показали неприменимость формулы А. Зинга: данные для большинства стоковых площадок вообще не показали связи скорости эрозии с длиной склона, лишь для двух станций показатель степени при L в среднем составил 0.74. Таким образом, значения этого показателя степени, рекомендуемые в руководствах по расчету скорости эрозии (0.5 в руководстве 1965 г, 0.3-0.5 в руководстве 1978 г) не имеют никакого научного или экспериментального обоснования.

Для получения зависимости скорости эрозии от уклона оказалось мало измерений. По имеющимся измерениям статистическая обработка дала параболу второй степени со свободным членом (s – уклон в %, θ – угол наклона):

$$\text{в 1957 г. } S = 0.43 + 0.3s + 0.034s^2$$

$$\text{в 1965 г. } S = 0.0076 + 0.0053s + 0.000076s^2$$

$$\text{в 1978 г. } S = 0.065 + 4.56\sin\theta + 65.41\sin^2\theta.$$

Наличие свободного члена, весьма значимого при малых уклонах и дающего эрозию при отсутствии уклона, показывает полное пренебрежение физическим смыслом формул

Таким образом, обоснованная формула для фактора рельефа LS в USLE получена не была и был создан некий договорной вариант такой формулы. Так что большой эмпирический материал (10000 площадко-лет), который обычно является главным аргументом для использования этого эмпирического метода в практике исследований эрозии почв, для получения фактора рельефа фактически использован не был, и подправленная формула А. Зинга [1940] с неясным физическим смыслом этих поправок осталась главным средством для оценки роли рельефа в эрозии почв.

В.С. Скирпичников

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭРОЗИИ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КУКШУМ

Река Кукшум протекает на северо-востоке Чебоксарского района с запада на восток. Является левым притоком первого порядка р. Цивиль. Исток реки расположен в Ботаническом саду г. Чебоксары. Его координаты: 56.081922 с.ш., 47.244595 в.д. Устье реки расположено на левом берегу р. Цивиль. Его координаты: 56.055060 с.ш., 47.556026 в.д.

С целью определения интенсивности эрозии в бассейне реки Кукшум Чебоксарского района была проведена работа по определению интенсивности плоскостной и линейной эрозии в её бассейне. Для этого было выполнено:

1. В ходе полевых выходов был определён расход реки в верхнем, среднем и нижнем течениях. Также были взяты пробы воды в верхнем, среднем и нижнем течениях реки, что позволило определить модуль стока взвешенных наносов в основные фазы водного режима. Для оп-

ределения скоростей течения реки нами использовалась вертушка гидрометрическая ГМЦМ-1. По данным площадей сечения и скоростей течения были определены месячные объёмы стока воды в разные фазы водного режима.

2. Отобраны пробы воды в верхнем, среднем и нижнем течении реки в осеннюю межень, зимнюю межень, весеннее половодье и определена масса взвешенных частиц, содержащихся в воде (мутность), путём фильтрации. Для определения мутности в разные фазы водного режима в верхнем, среднем и нижнем течении было взято 1,5 л. воды в верхнем, среднем и нижнем течении в разные фазы водного режима с помощью самодельного батометра, принцип работы которого аналогичен батометру-бутылке ГР-16. Для взвешивания фильтров использовались аналитические весы, точность которых 0,0001 г.

3. Рассчитан месячный сток наносов р. Кукшум в разные фазы водного режима и путём деления этой величины на площадь водосбора получить модуль стока взвешенных наносов, который характеризует величину плоскостной эрозии.

4. Построена карта эрозионных форм рельефа бассейна реки Кукшум – современную и XVIII века.

В ходе исследований были построены профили русла реки Кукшум в точках наблюдений в верхнем, среднем и нижнем течении в осеннюю межень, в зимнюю межень, в весеннее половодье

В период зимней межени величина модуля стока наносов с поверхности водосбора стремится к нулю, поэтому сток наносов в зимнюю межень даёт нам величину русловой эрозии. Сток наносов для определения величины модуля стока наносов с поверхности водосбора будет равняться:

Для осенней межени – разность между стоком наносов в осеннюю межень и стоком наносов в зимнюю межень.

Для зимней межени – примерно равен 0.

Для весеннего половодья – разность между стоком наносов в весеннее половодье и стоком наносов в зимнюю межень.

В качестве топографической основы были использованы карты ГГЦ масштабом 1:250000. В программе MapInfo на топографической основе были отмечены бассейн реки Кукшум, овраги, поймы, определена их площадь.

Незначительная – до 0,5 т/га – интенсивность плоскостной эрозии в осеннюю межень объясняется отсутствием талого стока и ливневых дождей в осенний период, которые являются причиной усиления плоскостной эрозии.

Интенсивность плоскостной эрозии, стремящаяся к нулю, в зимнюю межень объясняется наличием снежного покрова, который не даёт развиваться плоскостной эрозии.

Слабая/средняя интенсивность плоскостной эрозии (~1 т/га) в весеннее половодье связана с активным снеготаянием, которое способствует развитию плоскостной эрозии.

Таким образом, величина модуля стока наносов в разные фазы водного режима (осенняя межень, зимняя межень, весеннее половодье) позволила определить интенсивность плоскостной эрозии в бассейне реки Кукшум. Показатель интенсивности плоскостной эрозии важно учитывать в сельском хозяйстве.

На основе анализа карт можно сделать вывод, что хозяйственная деятельность человека усилила оврагообразование на тех территориях, где не ведётся городское строительство. На территориях, где ведётся городское строительство, небольшие овраги засыпаются.

В.В. Сурков, И.В. Крыленко, А.М. Тарбеева

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ЧЁТКОВИДНЫЕ РУСЛА РЕК КАРДАИЛ И КУПАВА (СЕВЕР ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)*

Чётковидные русла широко распространены в степной зоне Европейской территории России. Они представляют собой чередование округлых озёровидных расширений-чётков и узких мелководных каналов между ними. Они присущи малым (3-й – 6-й порядки) рекам с небольшим стоком влекомых наносов, интервалами уклонов 0,05-0,3‰ и средних максимальных расходов воды в 2-8 м³/с. (Савала, Бердия, Бузулук в верховьях, Тишанка, Мачеха и др.). Более мощные потоки разрушают перемычки, соединяют чётки и создают извилистое русло.

В 2022-2023 гг. чётковидные русла изучались на реках Купава и Кардаил (Волгоградская область), в среднем и нижнем течении которых насчитывается до 200 озёр-чётков. Озёра-чётки встречаются в больших количествах в малых притоках Кардаила (в балках), но отсутствуют в оврагах с большими уклонами, где поток в половодье насыщен наносами из-за активных размывов берегов и дна. Не встречены озёра-чётки на залесённых участках долин. Чётки слабо заносятся

© Сурков В.В., Крыленко И.В., Тарбеева А.М., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 23-27-00008),

(тонкие взвешенные наносы оседают на тростниковых перемычках) и существуют длительное время в старичных понижениях на пойме.

Кардаил – правый приток р. Бузулука длиной 148 км, площадь бассейна 1,9 тыс. км². Питание преимущественно снеговое. Половодье короткое (в среднем, 35 суток), с высоким острым пиком (подъём воды на 4-4,5 м). Максимальный срочный расход воды 112 м³/с, но средние максимальные расходы много меньше: 1%-ой обеспеченности – 6 м³/с, 10%-ой – 4,4 м³/с. Межень длинная, со второй половины апреля, с короткими дождевыми паводками. В половодье проходит 80-93% стока, в летне-осеннюю межень – от 7 до 20%. В конце лета сток прекращается, местами на перекатах река пересыхает. Купава, приток Кардаила, – река с похожими гидрологическими характеристиками, но с меньшей в 3-4 раза водоносностью. Половодье здесь короче (2-2,5 недели в конце марта – начале апреля) с подъёмом воды на 3-4 м. Средний максимальный расход воды 1%-ой обеспеченности около 2 м³/с, 10%-ой – 1,2 м³/с; срочные максимальные расходы воды – 25-27 м³/с. Зимой сток рек минимален (10-30 л/с), реки редко перемерзают.

Исследованные участки долин корытообразные, шириной 0,5-2 км; покатые борта высотой 40-60 м – моренные холмы среднечетвертичного (днепровского) возраста. В долинах развита надпойменная терраса высотой 5-6 м, высокая (3-5 м) и низкая (1-3 м) поймы. Терраса и склоны долин распаханы, пойма луговая, используется, как пастбище. Побережья и перемычки занимают тростники и осоковые луга. Местами на пойме сохранились дубравы и ивово-ольховые леса. В днищах долин преобладают плотные суглинки и глины, иногда с линзами мелких песков и супесей. Они вскрываются на глубине 1-1,5 м под тростниковыми перемычками, в озёрах-чётках глубина её залегания не менее 7-8 м ниже меженного уреза.

На исследованных участках Кардаил и Купава образуют излучины, осложненные вторичными изгибами и озёровидными расширениями-чётками. Излучины преимущественно врезаны в поверхность высокой поймы, и, вероятно, являются более древними, чем современное русло, образующее вторичные изгибы в пределах низкого уровня поймы, сформированного в днище этого древнего русла. Ширина современного русла на крыльях излучин (около 4-5 м) существенно (более, чем в 10 раз) меньше шага излучин (100-300 м), что говорит о несоответствии размеров излучин современной водности потока. Озёровидные расширения русла имеют ширину 20-50 м и не выходят за пределы бровок древнего извилистого русла. Реконструируемая по бровкам высокой поймы ширина древнего извилистого русла составляет 35-80 м, в нем преобладают развитые сегментные и крутые сегментные излучины,

много пальцевидных, сундучных и омеговидных излучин с отношением длины к шагу 4-5, радиусом кривизны от 70 до 300 м, коэффициентом извилистости 1,7-2,4. Большинство древних излучин свободные, часть – адаптированные вписанные, опирающиеся на коренные берега.

Округлые, эллипсовидные или каплеобразные озёра-чётки имеют ширину 20-50 м, длину 50-150 м. Средняя глубина озёр 3-4 м, иногда до 6 м. Максимальные глубины часто приурочены к верхней по течению части чёток, где в половодье отмечаются водоворотные зоны. Скорости течения в их нижней части, даже в половодье, близки к нулевым. Перемычки между чётками – это заросшие тростником участки низкой поймы длиной от 30-50 до 400 м, с узким (1-3 м) щелевидным каналом – современным руслом посередине. В половодье поток часто обходит тростниковую пробку, армированную льдом и ещё промёрзшую, вырабатывая боковые промоины вдоль центрального канала и расширяя перемычку. Но из-за плотных суглинков и глин, слагающих берега, расширение идёт медленно, размывы не превышают первых десятков сантиметров в год, а озера-чётки стабильны в плане. Чётковидные русла Кардаила и Купавы характеризуются крайне медленными темпами горизонтальных деформаций.

Чётковидные русла Кардаила и Купавы возникли при снижении водоносности рек и зарастании части дна древнего русла. Чётки являются унаследованными плёсами древнего меандрирующего русла. В то же время, перемычки между плёсами сложно считать результатом заиления, поскольку илистые осадки на дне рек незначительны или отсутствуют. Для подтверждения или опровержения гипотезы о изначально мерзлотном происхождении плесов необходимы более детальные исследования состава и возраста отложений.

Л.Н. Трофимец¹, Е.А. Паниди², А.О. Баркалов¹

¹Орловский государственный университет имени И.С.Тургенева,

²Санкт-Петербургский государственный университет

ПОЯС МИНИМАЛЬНОЙ ЭРОЗИИ НА КАРТЕ ПЛОЩАДИ СБОРА (НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УЧАСТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПОЛЯ В БАССЕЙНЕ СУХОЙ ОРЛИЦЫ)*

При применении радиоцезиевого метода к расчету потерь почвы вследствие эрозии возникает необходимость расчета опорного значения запаса (активности) цезия-137. Опорные площадки рекомендуется назначать на водораздельных поверхностях. Именно там наблюдаются минимальные потери почвы вследствие эрозии. Однако в поле сложно обнаружить участок на водораздельной поверхности, где необходимо искать блочные повышения (в их пределах будет отмечаться наименьший смыв почвы). Существующие рекомендации предлагают отбирать пробы почвы в нескольких точках на водораздельной поверхности. В случае если коэффициент вариации активности (запаса) цезия-137 велик (не более 0,2), следует принимать решение о выборе в пределах этого участка опорной площадки.

Работая на экспериментальном участке сельскохозяйственного поля в бассейне Сухой Орлицы, авторы поставили задачу проанализировать, в пределах каких величин значений площади сбора следует назначать опорные площадки. Площадь сбора – это морфометрический показатель рельефа, который показывает величину потенциальной площади, с которой в искомую точку поступает смытая с окружающей территории почва. Площадь сбора рассчитывается в ГИС. Наложение на слой ГИС «площадь сбора» слоя точечных значений активности цезия-137, измеренных вдоль трансект, пересекающих склоновую поверхность (включая ее водораздельную часть), позволило выделить пояс, в пределах которого по всей длине водораздельной линии встречались значения измеренной активности цезия-137, близкой или равной 174,7 Бк/кг. Значение 174,7 Бк/кг было принято авторами ранее в качестве опорного значения. В расчет опорного значения были включены данные гамма-спектрометрического анализа проб почвы, отобранных ранее послойно по глубине на блочных повышениях водораздельного пространства. Анализируя значения площади сбора вдоль водораздельной поверхности, в пределах которых были отмечены измеренные в пахотном горизонте 0-25 см значения активности цезия-137 черномыльского происхождения, близкие по величине к 174,7 Бк/кг, уста-

новили, что такие значения преимущественно встречаются в пределах площади сбора не более 500 м². Ширина этого пояса (названная авторами поясом минимальной эрозии) изменяется от 6 до 100 м. Вариабельность активности цезия-137 в пределах выбранного пояса составила 0,3. Для выяснения причины повышенной вариабельности, на карту масштаба 1:10000 был наложен слой «площадь сбора», построенный по материалам тахеометрической съемки в более крупном масштабе (в масштабе 1:500). Крупномасштабный анализ показал, что водораздельная поверхность в пределах площадей сбора 500 м² оказалась испещренной тальвегами микроложбин. Именно тем, что точки пробоотбора «попадают» то на микроводораздел (блочное повышение), то в тальвег микроложбин, объясняется вариабельность цезия-137. Блочные повышения (их размеры 15-25 м) и межблочные понижения (размеры понижений 10-20 м) на карте масштаба 1:10000 не отображаются, но отображаются в масштабе 1:500. В таблице 1 приведены значения активности цезия-137, измеренные в пределах водораздельной поверхности в пахотном слое 0-25 см. Из таблицы видно, что значения цезия-137, близкие к 174,7 Бк/кг, маркируются площадью сбора преимущественно в пределах 433-508 м². Можно считать, что площадь сбора 500 м² может быть принята в качестве пояса минимальной эрозии. Он простирается вдоль водораздела на расстояние 1500 м.

Вывод. Для установления местоположения опорных площадок целесообразно использовать или космические снимки сверхвысокого разрешения и GPS съемку или крупномасштабную топографическую съемку.

Таблица 1. Активность цезия-137 на водораздельной поверхности

№ тран-секты	Цезий-137, Бк/кг (мах)	Площадь сбора, м ²	Диапазон активности цезия-137 на водораздельной поверхности, Бк/кг	Местоположение точки	Ширина пояса минимальной эрозии, м
1	177,6	361	177,6-155,4	В пределах пояса минимальной эрозии	85
2	178,7	490	178,7-144	то же	83
3	174,9	441	174,9-144	"	94
4	178,5	466	178,5-141,3	"	41
5	162,3	508	162,3-114,2	"	42
6	190,6	654	145,8	вне пояса	27
7	179,6	1250	нет данных	то же	9,6
8	171,4	1480	то же	-	35,1
9	163,6	450	163,6-154,1	В пределах пояса минимальной эрозии	38,3
10	170,6	1037	156,9-95,3	вне пояса	9,5
11	175,7	1051	122,6-88,9	то же	6,5
12	172,2	433	172,2-130,6	В пределах пояса минимальной эрозии	40,2

Е.А. Тузова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ НА ПОЛУГОРНЫХ РЕКАХ
НА ПРИМЕРЕ р. БЕЛОЙ***

Река Белая – один из крупнейших левобережных притоков р. Кубани. Площадь ее водосбора 5990 км², а среднегодовой расход воды в районе Белореченского гидроузла – 104 м³/с. Средний уклон составляет 7‰, изменяясь от 200‰ в верховьях до 0,2‰ в нижнем течении. Продольный профиль – вогнутый. Ширина меженного русла составляет в среднем и нижнем течении 80-100 м, на отдельных участках превышая 150 м.

Определение динамики русла осуществлялось на основе сравнения положения меженного русла за разные временные интервалы с использованием методов программного комплекса ArcGis. На космических снимках автоматически выделялась водная поверхность реки, после чего определялось положение осевой линии меженного русла

Оценка горизонтальных деформаций методом средних (осевых) линий осуществлялась за период продолжительностью 31 год на основе анализа космических снимков спутников Landsat 4 и 8 за 1989 и 2020 гг. соответственно.

Для анализа переформирований русла и расчета среднесуточной скорости размыва берегов за больший промежуток времени был использован один из наиболее ранних спутниковых снимков – монохромный космический снимок «КН» 1965 г (разрешение 2,5 м), а также современный снимок «Planet Labs» 2020 г. с разрешением 3 м и высоким качеством привязки.

На р. Белой было выделено 5 участков (таблица 1): от истока до впадения р. Киши, от р. Киши до впадения р. Дах (46), от р. Дах до р. Пшеха (36), от впадения р. Пшехи до плотины Белореченского г/у (26) и от Белореченского г/у до устья (16). На верхнем участке река протекает в условиях ограниченного развития русловых деформаций, расчеты для него не производились.

© Тузова Е.А., 2023

* Работа выполнена при поддержке ЦКП Геопортал, МГУ имени М.В. Ломоносова и при финансовой поддержке РФН (проект 23-17-00065)

Таблица 1. Средние, однопроцентные и максимальные скорости смещения динамической оси потока р. Белой (м/г)

Участок	Длина, км	Метод средних линий				Ручная обработка		
		1989-2020		1965-2020		1965-2020		
		$v_{\text{ср}}$	$v_{1\%}$	$v_{\text{ср}}$	$v_{1\%}$	Кол-во участков	$v_{\text{ср}}$	v_{max}
46	91	0,9	5,1	0,9	3,9	31	1,0	2,3
36	37	2,6	10,0	1,6	5,9	13	1,9	3,8
26	7	3,3	8,6	3,8	9,0	1	2,4	2,4
16	84	3,5	16,9	2,6	11,1	27	2,0	4,8

Практически по всей длине реки значения скорости смещения динамической оси потока за 31-летний период оказались выше, чем за 55 лет. Среднемноголетняя скорость смещения средней линии в период 1989-2020 гг. составила 2,1 м/г, в период 1965-2020 гг. – 1,8 м/г. Однако, при сравнении не скоростей, а расстояний смещения средней линии выявлено, что на большем протяжении реки эти значения за 31 год и за 55 лет сопоставимы.

Детальный анализ 31-летнего интервала показал, что при уменьшении временных периодов, то есть знаменателя при расчете скорости, темпы смещения динамической оси потока увеличиваются. В связи с этим было высказано предположение о цикличности переформирований со средней продолжительностью цикла 10 лет.

Данные полуавтоматического метода сравнивались с результатами, полученными при помощи ручной обработки снимков. На р. Белой было выделено 72 участка размыва берега в период с 1965 до 2020 г. Среднемноголетние скорости размыва составляют 1,6-2,1 м/год. Наблюдается увеличение скорости размыва вниз по течению. Наибольшие скорости размыва отмечаются на участках ниже впадения р. Пшеха и Белореченского гидроузла, где водность реки увеличивается вдвое, а перед гидроузлом формируется разветвление основного русла на два рукава, которые достаточно быстро меняют очертания, образуют излучины и перетоки.

Е.А. Фингер

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

СОЗДАНИЕ КАРТЫ МУТНОСТИ ВОДЫ РЕК БАССЕЙНА ЛЕНЫ*

Изучение стока наносов впервые в нашей стране было организовано на реках Средней Азии и Кавказа в 1910 г. для нужд ирригации. К концу 1970-х сеть Гидрометслужбы систематически наблюдала за мутностью воды, стоком взвешенных наносов и их гранулометрических составом более чем на 1600 постах [Караушев, 1977]. Сейчас измерения мутности выполняются примерно на 700 постах.

Параметры стока наносов характеризуются дискретным характером распределения. Поэтому при картировании стока наносов используют способ районирования, выделения зон, характеризующихся заданными пределами изменения картируемых величин. Наиболее удобной характеристикой является средняя многолетняя мутность рек. Пределы изменения средней мутности рек, расположенных в однородных по эрозионным условиям районах, определяются с помощью графиков связей многолетних модулей стока наносов и воды.

Первая карта мутности рек была составлена Г.В. Лопатиным в 1939г. для Европейской территории СССР. Продолжительность наблюдений в половине пунктов наблюдения не превышала 1-2 лет. На всю территорию СССР карту средней мутности составил Г.И. Шамов в 1949г., продолжительность наблюдений в половине пунктов наблюдения не превышала 3-10 лет. В 1972 г. К.Н. Лисицына составила карту мутности рек СССР, уточнив данные на территории Сибири и Кавказа, где увеличилось число пунктов наблюдения в 2 раза. В 1977г. была опубликована карта среднемноголетней мутности рек СССР [Сток наносов..., 1977]. Последняя карта среднегодовой мутности рек России и стран СНГ опубликована в 1996 г. Н.Н. Бобровицкой [Bobrovitskaya, 1996].

На карте среднемноголетней мутности рек СССР на бассейн Лены попадает три диапазона мутности: менее 25, 25-50 и 50-100 г/м³. На карте Н.Н. Бобровицкой бассейн Лены попадает в два диапазона: 10-25 и 25-50 г/м³. Зона, попадающая в градацию 50-100 на карте 1977г, была отнесена к диапазону 25-50 на более поздней карте.

Изменение [Магрицкий, 2015] климата и хозяйственное использование создали предпосылку для обновления данных по стоку наносов в бассейне Лены. Автором была собрана база данных со среднемесеч-

© Фингер Е.А., 2023

* Выполнено при поддержке РНФ (проект 21-17-00181) «Интегральная оценка баланса наносов речной системы р. Лены».

ными расходами наносов и расходами воды по постам в бассейне Лены. Сначала рассчитывались среднегодовые значения расходов наносов и расходов воды для каждого поста. Затем путем деления расхода наносов на расход воды были получены среднегодовые значения мутности. Среди всех постов были отобраны те, период наблюдения на которых был не менее 8 лет, начиная с 1978г. Таким образом, были накоплены ряды мутности по 53 постам с продолжительностью измерения от 8 до 43 лет. Значения среднегодовой мутности меняются от 0,05 до 63 г/м³. В соответствии с градацией на карте мутности 1978г., мутность была разделена на 3 категории (низкая – менее 25 г/м³, средняя 25-50 г/м³ и высокая – более 50г/м³) [Сток наносов..., 1977].

Среднегодовая мутность выше 50 г/м³ наблюдается на 2 постах как за период 78-20, так и за весь инструментальный период наблюдений. Это посты Жуя-Светлый и Намана-Мякинда, которые занимают менее 1 % водосбора Лены (21698 км²). Средняя мутность отмечена на 14 постах для периода 78-20 и на 16 постах для всего периода наблюдений. Лена-Змеиново и Виллой-Хатырык-Хомо за последние сорок лет перешли из группы со средней мутностью в группу с низкой. Вероятно, это связано как с сокращением добычи полезных ископаемых на верхней Лене, так и с перехватом наносов Виллойским водохранилищем. Оставшихся 37 постов характеризуются низкой мутностью менее 25 г/м³.

Предварительный анализ показывает, что с 1978г. на верхней Лене (Чанчур, Качуг и Змеиново) преобладает низкая мутность, ниже по течению мутность увеличивается (Солянка, Табага и Кюсюр – средняя мутность). На всех постах в бассейне Виллой низкая мутность. А вот Алдан и Верхняя Лена имеют более контрастные условия формирования мутности. Верхняя Лена характеризуется низкой мутностью, за исключением притока Кута. Также средняя мутность наблюдается на Витиме и его притоках (Романовка, Бодайбо, Багдарин, Чара, Пеледуй, Б. Патом). Реки Жуя и Намана единственные попали в группу высокой мутности. Жуя близко расположена к добыче алмазов в Бодайбо. В бассейне Алдана средняя мутность наблюдается на притоках В. Нерюнга и Аллах-Юнь, а также в Верхоянском Перевозе, на остальных постах – низкая мутность.

С учетом климатических трендов и закрытия многих постов в 90-е гг., было принято решение взять период 1988-2020 и 2004-2020 за второй и третий периоды рассмотрения «современной мутности». В таком случае количество постов с продолжительностью ряда наблюдений не менее 8 лет сокращается до 46 до 90-х и 34 поста после 90-х годов. Значения среднегодовой мутности варьируются от 0,04 до 58 г/м³. Получилось, что в период с 1988 по сравнению с 1977-2020 4 поста с наблюдаемой средней мутностью перешли в посты с низкой мутностью, среди постов с высокой мутностью один закрылся (Жуя- Светлый), а другой перешел

в категорию со средней мутностью. После 2004г. воды Лены стали менее мутными- еще 6 постов перешли из категории средней мутности в низкую, и только на притоке Чара-Токко мутность увеличилась до высокой. Этот пост расположен ниже впадения протока Жуя, на котором была отмечена высокая мутность в предыдущий период, но пост перестал действовать. В начале XXI века на большинстве постов Лены отмечена низкая мутность, средняя мутность наблюдается на Витиме-Романовке, и на средней Лене в Солянке и Табаге, высокая мутность на притоке Чара.

Ф.Х. Хикматов¹, Г.У. Жумабаева²

¹*Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улукбека,*

²*Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»*

ОЦЕНКА ВКЛАДОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ РЕК

Формирование стока взвешенных наносов рек является результатом воздействия климатических факторов, в частности, атмосферных осадков и температуры воздуха на подстилающую поверхность речных бассейнов. Это положение указывает на необходимость поиска зависимостей стока речных наносов от климатических факторов. Данная работа посвящена оценке вкладов климатических факторов в формирование стока взвешенных наносов рек Узбекистана и сопредельных территорий.

В качестве исходных материалов были использованы средние месячные и годовые расходы взвешенных наносов рек изучаемой территории. Значения атмосферных осадков и температуры воздуха получены по данным метеорологических станций и постов, действующих в бассейнах изучаемых рек.

Расчеты выполнены с использованием объективного метода выравнивания и нормализации корреляционных связей, предложенного Г.А. Алексеевым. Получены уравнения нормализованной регрессии, имеющий общий вид:

$$U_0(R) = \alpha_{01} \cdot U_1(X_3) + \alpha_{02} \cdot U_2(X_\pi) + \alpha_{03} U_2(t_\pi), \quad (1)$$

где $U_0(R)$, $U_1(X_3)$, $U_2(X_\pi)$ и $U_2(t_\pi)$ – нормализованные значения, соответственно, расходов взвешенных наносов, зимних и летних осадков, температуры воздуха теплого периода (апрель-сентябрь); α_{01} , α_{02} , α_{03} – коэффициенты регрессии.

Произведена статическая оценка вкладов климатических факторов – атмосферных осадков разных сезонов и температуры воздуха в вышеприведенном уравнении нормализованной регрессии с применением формулы

$$\delta(X_j) = \frac{r_{0j} \cdot \alpha_{0j}}{r_0} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где r_{0j} – парный коэффициент корреляции; α_{0j} – коэффициент регрессии; r_0 – полный коэффициент корреляции.

Анализ результатов расчетов показал, что вклады летних осадков колеблются в пределах от 4% (Нарын – г. Нарын) до 62% (Гузардарья – с. Яртепа), вклад зимних осадков изменяется от 11% (Зеравшан – м. Дупули) до 78 % (Чаткал – с. Чарвак). Наибольшее значение вклада температуры воздуха получено для р. Зеравшан, которая относится снегово-ледниковому типу питания, по классификации О.П. Щегловой (таблица 1).

Произведено сопоставление вкладов климатических факторов в формирование стока взвешенных наносов рек с долями дождевого, талого снегового и ледникового смылов, вычисленными О.П. Щегловой [1984]. Выявленные некоторые отклонения объясняется тем, что, во-первых, принятое нами деление осадков на зимние и летние, характеризуют неполное их фазовое состояние, во-вторых, дождевые воды выносят не только продукты эрозионной деятельности жидких осадков, но и рыхлый материал, подготовленный предшествующим снеготаянием.

Таблица 1. Сравнение вкладов климатических факторов в формирование стока взвешенных наносов реки с долями дождевого (Д), талого снегового (ТС) и ледникового (Л) смылов

№ п/п	Река – пункт	Вклад, в %			Доля смыла, в %			
		$\delta(X_\pi)$	$\delta(X_3)$	$\delta(t_\pi)$	Д	ТС	Л	PP+T С
1	Акдарья – к. Хазарнау	27	68	5	38,7	48,8	4,9	56,4
2	Яккабагдарья – с. Татар	34	62	4	45,1	39,0	0	54,9
3	Гузардарья – с. Яртепа	62	36	2	72,1	15,4	0	27,9
4	Зеравшан – м. Дупули	6	11	83	12,0	14,1	67,7	20,3
5	Нарын – г. Нарын	4	23	73	30,8	16,3	43,3	25,9
6	Тентяксай – с. Чарвак	39	58	3	40,9	48,0	0	59,1
7	Кассансай – устье р. Урюкты	37	60	3	72,0	12,0	12,0	-
8	Чаткал – с. Чарвак	20	78	2	49,0	27,4	6,4	44,6
9	Пскем – устье	36	59	5	54,2	18,0	6,2	39,6
10	Угам – с. Ходжикент	34	65	1	47,6	34,8	0	52,4
11	Ахангаран – с. Турк	29	66	5	57,4	27,6	0	42,6

Примечание: $\delta(X_\pi)$, $\delta(X_3)$ и $\delta(t_\pi)$ – вклады, соответственно, летних, зимних осадков и температуры воздуха; PP – русловой размыв.

Методом нормализации корреляционных связей нам не удалось оценить вклад русловой компоненты стока наносов. Поэтому, учитывая первенствующую роль талого снегового стока в размыве речных русел, было произведено дополнительное сопоставление результатов обоих методов: вклад зимних осадков сравнивался с суммой талого снегового смыва и руслового размыва, определенного путем расчленения хронологического графика мутности. Как видно из таблицы 1, их соответствие в этом случае гораздо лучше.

Ф.Х. Хикматов, К.Р. Рахмонов

Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ СМЫВА ПОЧВО-ГРУНТОВ С ПОВЕРХНОСТИ БАСЕЙНОВ ГОРНЫХ РЕК

Исследование смыва почво-грунтов с поверхности горных речных бассейнов имеет большое научное и практическое значение. Результаты изучения данной проблемы позволят решить ряд задач, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией водохранилищ, каналов и других видов гидротехнических сооружений. Рассмотрение этого вопроса на примере горных рек Узбекистана и соседних стран – Казахстана, Кыргызстана и Таджикистана имеет особую актуальность, так как в настоящее время на территориях этих независимых государств эксплуатируют многочисленные водохранилища ирригационного и энергетического назначения, а также крупные гидроузлы и каналы.

Целью данной работы является оценка интенсивности смыва почво-грунтов с поверхности бассейнов горных рек Узбекистана и сопредельных территорий. В качестве объекта исследования были выбраны горные реки, относящиеся к бассейнам Чирчика, Ахангарана, Сангзар-Заминсу, Зеравшана, Кашкадарьи и Сурхандарьи.

При выборе расчетных гидрологических постов основное внимание уделено на сохранность естественного гидрологического режима и длительность рядов наблюдений за стоком взвешенных наносов рек. Следует отметить, что в расчётах использованы данные наблюдений о расходах средних месячных и годовых величин речных наносов, произведенных за период 1965-2020 годы.

Рассчитаны средние за многолетний период значения расходов воды (Q), расходов взвешенных наносов (R), модуля смыва, т.е. модуля стока наносов (M_R) и слоя смыва (h_R). Как известно, последние два гидрологических показателя непосредственно характеризуют интенсивность процессов смыва почво-грунтов, протекающих на поверхности бассейнов изучаемых рек (таблица 1).

Таблица 1. Гидрологические показатели, характеризующие интенсивность смыва с поверхности бассейнов горных рек Узбекистана и сопредельных территорий

№ п/п	Река- пост	F, км ²	Среднегодовые показатели смыва за многолетие			
			Q, м ³ /с	R, кг/с	M_R , т/км ² ·год	h_R , мм/год
1	Пскем-к. Муллала	2540	76,5	12,7	158	0,105
2	Чаткал-у.р. Худайодсай	6580	111	30,0	144	0,096
3	Угам-к. Ходжикент	869	22,8	8,90	323	0,215
4	Ахангаран-к. Ерташ	1110	20,3	4,42	118	0,079
5	Нишбаш-к. Нишбаш	141	2,79	0,129	28,9	0,019
6	Заминсу-к. Дуаба	546	1,94	0,297	17,1	0,011
7	Сангзар-к. Кирк	570	2,01	0,549	30,4	0,020
8	Ургутсай-г. Ургут	25,1	0,386	0,106	133	0,089
9	Кашкадарья-к. Варганза	511	5,25	2,56	158	0,105
10	Ақдаря-к. Хазарнова	845	12,3	7,85	294	0,195
11	Тупаланг-к. Зарчоб	2200	54,9	31,2	447	0,298
12	Шерабад-к. Дербент	949	4,99	1,91	63,4	0,042

Примечание: F – площадь водосбора, R – расход взвешенных наносов, Q – расход воды, M_R – модуль стока наносов, h_R – слой смыва.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшей интенсивностью смыва выделяется река Тупаланг (к. Зарчоб), которая относится к бассейну Сурхандарьи. Значения модуля смыва данной реки составляет $M_R=447$ тонн/км²·год. Соответственно этому значению модуля смыва почво-грунтов, величина слоя смыва равна $h_R=0,298$ мм/год. Такая интенсивность смыва, естественно, отрицательно влияет на проектные объемы существующих в бассейне Сурхандарьи Тупалангского, Южно-Сурханского, Учкызылского и других водохранилищ.

В бассейне реки Чирчик интенсивный смыв почво-грунтов происходит с поверхности бассейна реки Угам, где среднее годовое значение модуля стока наносов равно $M_R=323$ тонн/км²·год, а слоя смыва $h_R=0,215$ мм/год. Здесь, по интенсивности смыва мелкозёма, также выделяются бассейны рек Пскем (к. Муллала) и Чаткал (у.р. Худайодсай), объемы стока речных наносов которых определяют скорость

заиления чаш каскада водохранилищ – Чарвакского, Ходжикентского и Газалкентского.

Другим районом, выделяющимся ускоренной интенсивностью смыва, является бассейн Кашкадарьи. Здесь наиболее интенсивный смыв почво-грунтов наблюдается с поверхности бассейна реки Аксу (к. Хазарнова, $M_R=294$ тонн/км²·год) и с бассейна самой реки Кашкадарьи (к. Варганза, $M_R=158$ тонна/км²·год). В бассейнах этих рек ежегодный фоновый слой смыва мелкозёма составляет, соответственно, $h_R=0,195$ и $h_R=0,105$ мм. Материалы смыва почво-грунтов с бассейнов этих рек, осаждаясь на дне Гисаракского и Чимкурганского водохранилищ руслового типа, увеличивают темпы заиления и, в конечном итоге, уменьшают объемы их водовместимости.

Полученные результаты сопоставлены с данными предшествующих исследователей [Шульц, 1965; Иванов, 1967; Щеглова, 1972, 1984; Хикматов, 2002]. Выявленные некоторые отклонения в значениях модуля стока наносов объясняются различием расчетных периодов или переносами гидрологических пунктов наблюдений за стоком взвешенных наносов на изучаемых реках.

А.С. Цыпленков¹, В.Н. Голосов^{1,2}

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

²*Институт географии РАН*

ТРЕНДЫ СТОКА НАНОСОВ НА РЕКАХ КАВКАЗА НА ФОНЕ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА И РАЗНОНАПРАВЛЕННОГО АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕЧНЫЕ БАСЕЙНЫ*

Формирование стока наносов рек в различных высотных поясах гор существенно отличается в связи с различным соотношением вклада русловой и бассейновой составляющих. Фактически в горах именно вклад бассейновой составляющей определяет режим стока конкретной реки, так как в зависимости от потока наносов, поступающего в русла водотоков её бассейна, проявляется доминирующий про-

© Цыпленков А.С., Голосов В.Н., 2023

* Выполнено по плану научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М. В. Ломоносова (№ 121051100166-4 – обзор литературы) при финансовой поддержке РНФ (проект 22-17-00181 – расчёты, обработка данных).

цесс (эрозия или аккумуляция) в её русле. Поскольку поступление наносов со склонов водосбора в русла рек дискретно во времени и пространстве, а также разительно отличается по объёму транспортируемого материала, для горных рек типично чередование периодов доминирования процессов врезания и аккумуляции. Режимные наблюдения на гидропостах включают только измерения расходов воды и средней мутности поток. и доступны только ряды изменений стока взвешенных наносов. Детальность этих данных недостаточно высока, так как отбор проб на мутность проводится нерегулярно. Особенно важно подчеркнуть, что режимными наблюдениями не охвачен сток наносов при экстремальных событиях, так как при их прохождении из-за высоких скоростей потока чаще всего невозможно отобрать качественные пробы воды, а расход оценивается по кривой зависимости расходов от уровня воды в измерительном створе. Кроме того, недостаточная частота отбора проб на мутность в период обычных подъёмов уровней воды при прохождении паводков приводит к тому, что в большинстве случаев оказываются неизмеренными мутности при максимальном расходе. Наконец, в зависимости от условий поступления наносов в речной поток максимальные мутности могут наблюдаться не на максимуме расходов воды, а при его подъёме. Таким образом, фактически при анализе временных рядов расходов взвешенных наносов можно говорить только о разнонаправленных во времени трендах их изменений, а не об их абсолютных значениях, которые по сути неизвестны. Тем не менее, следует понимать, что формирование экстремального стока воды и стока наносов обусловлено значительным поверхностным и внутрипочвенным стоком, которые, особенно в горах, способствуют активизации экзогенных процессов. Набор экзогенных процессов, поставляющих сток наносов, включает плоскостной смыв, линейные размывы, оползни и сплывы различного типа и размеров, а также прорывов боковых морен в приледниковых зонах и других катастрофических явлений, способствующих поступлению избыточного объёма наносов в водотоки. Наиболее высокая связность потоков наносов, формирующихся на склонах, с речными руслами характерна для небольших рек первых порядков, на которых отсутствуют наблюдательные створы. При этом связность потоков наносов, поступающих со склонов в русла рек максимальна в перигляциальной зоне. В дальнейшем она сокращается по мере роста проективного покрытия склонов и в целом контролируется в большей степени уклонами склонов и мощностью рыхло-обломочного чехла. При этом большие уклоны русел рек первых порядков способствуют высокой транспортирующей способности потоков. По мере роста размеров рек в среднем происходит расширение их

днища и резко сокращается вероятность поступления наносов непосредственно со склонов в русла рек. Основной поток наносов в их русла поступает из притоков – водотоков первых порядков. В период их формирования значительные объёмы рыхлообломочного материала переоткладываются на различных участках русел рек четвертого и больших порядков. В дальнейшем происходит размыв переотложившегося материала. Вследствие этого вклад экстремальных событий всё же находит своё отражение в трендах стока наносов, так как размыв данных участков избыточной аккумуляции способствует повышению мутности реки по её длине.

Для анализа трендов стока наносов на реках Кавказа были собраны и обработаны многолетние ряды данных наблюдений на 244 гидрологических постах с измеренными расходами воды и мутностью со средним медианным периодом наблюдений 18 лет. Местоположение гидрологических постов определялось по топографическим картам и спутниковым снимкам. Границы водосборов определены по глобальной цифровой модели рельефа ALOS World 3D (AW3D30) Японского агентства аэрокосмических исследований с пространственным разрешением 25 м. Гидрологическая коррекция и отрисовка границ водосбора произведена в ArcMap 10.8. Для валидации данных наблюдений на гидрологических постах использовались ранее опубликованные данные о заилении водохранилищ на р. Кубани [Курбатова, 2014; Лагута, Погорелов, 2018, 2019; Погорелов и др., 2022] и р. Сулаке [Петров, Саидов, 2019]. Для визуализации и лучшего понимания пространственных закономерностей стока взвешенных наносов Кавказ средне-многолетний модуль стока взвешенных наносов SSY был проинтерполирован в границах региона. Был использован метод k -ближайших соседей с предиктором высоты рельефа местности, реализованный на языке программирования R при помощи библиотеки *knn* [Schliep, Hechenbichler, 2016].

Среднемноголетний модуль стока взвешенных наносов SSY_{cp} равен $446 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (станд. откл. = 618), медианный SSY_{med} – $200 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Данные величины практически идентичны модулям стока наносов, посчитанных (Vanmaercke et al., 2011) для Альп: среднемноголетний модуль стока $451 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (станд. откл. = 876, $SSY_{med} = 198$). В целом средние значения SSY_{cp} выше в северной части Большого Кавказа ($504 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), чем в южной части ($396 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Разница является статистически значимой и не связана с перепадами высот. Кроме того, значения SSY_{cp} очень низкие ($< 50 \text{ т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) на большей части Малого Кавказа в пределах территорий Армении и Азербайджана, особенно в горной степной зоне. Наибольшие значения

SSY_{cp} ($>1\ 000\ \text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) наблюдаются в степной зоне Дагестана (Восточный Кавказ), где очень высока антропогенная нагрузка на водосборы, обусловленная перевыпасом скота, что способствует резкому увеличению темпов водной эрозии и других экзогенных процессов. При этом активному поступлению рыхлообломочного материала со склонов в днища долин способствуют характер расчленения рельефа и высокая сейсмичность территории [Golosov, Tsyplenkov, 2021].

Основными факторами, определяющими тренды изменения стока взвешенных наносов, являются метеорологические условия, а именно – количество выпадающих осадков и температурный режим, а также скорости отступления ледников и изменения в землепользовании. При этом скорости отступления ледников самым тесным образом связаны с изменениями температуры воздуха. Другие факторы, а именно различные параметры рельефа, сейсмичность территории, её литологическое строение в значительной мере определяют формирование стока наносов рек и его пространственную вариабельность, но не сказываются на трендах изменений стока наносов в исследуемом масштабе времени, так как более консервативны.

Для южного склона Западного Кавказа тренды стока наносов в основном определяются антропогенным воздействием, сказывающемся на соотношении площадей с различным землепользованием. При этом слой осадков остаётся стабильным за последние 100 лет, хотя и подвержен большим межгодовым флуктуациям. Рост доли селитебных земель во многих речных бассейнах способствуют положительному тренду стока наносов. Реки данной части Большого Кавказа уже не имеют ледникового питания и поэтому этот фактор также не сказывается на тренде изменения стока наносов.

Таяние ледников и активизация денудационных процессов вносит определённый вклад в сток наносов рек северного мегасклона Западного Кавказа. Но основным фактором является сокращение площадей обрабатываемых земель в этой части Большого Кавказа. Для северного склона Западного Кавказа ловушкой наносов является Краснодарское водохранилище, созданное на р. Кубани в 1973 г. В водохранилище поступает сток наносов рек, дренирующих большую часть региона. Среднегодовой сток взвешенных наносов р. Кубани в период 1940–1960 гг. в створе нынешнего водохранилища составлял $8\ \text{млн. м}^3\ \text{год}^{-1}$ [Беркович, 2012]. Темпы заиления водохранилища в период с середины 1980-х годов стали сокращаться, что указывает на сокращение суммарного стока наносов в бассейне р. Кубани, дренирующего большую часть северного склона Западного Кавказа. В целом для рек бассейна выявлен отчётливый тренд снижения стока наносов. Годовой

слой осадков практически не изменился за последние десятилетия. Снижение объёма поступающих наносов связано с некоторым сокращением ледникового стока и существенным сокращением площади пахотных земель в горах, особенно в Адыгее [Buchner et al., 2020].

Для Восточного Кавказа наиболее наглядно тренд стока наносов выявляется на основе данных наблюдений за заилением каскада водохранилищ на р. Сулак и его притоках. В целом можно говорить о том, что максимальные модули стока наносов выявлены для водосбора р. Андийского Койсу, которая является левобережным притоком р. Сулака, впадающем в Чиркейское водохранилище. Для данного водосбора характерен отчётливый тренд роста стока наносов, который, скорее всего, связан с усилением эрозии на склонах за счёт роста поголовья выпасаемого на пастбищах скота, а также увеличением повторяемости экстремальных ливней [Торопов и др., 2018]. На остальной части бассейна р. Сулака сток наносов остаётся стабильно высоким, но отчётливого тренда роста не выявлено.

В бассейне р. Терек, который дренирует северный мегасклон Центрального Кавказа, нет крупных водохранилищ, объёмы накопления наносов в которых за разные интервалы времени могли бы использоваться для оценки тренда суммарного стока наносов с водосбора. Детальный анализ трендов изменений стока наносов в речных бассейнах различных высотных зон данного бассейна позволил выявить для большинства рек смену положительного тренда, начавшегося с 1950-х годов, на отрицательный с точкой перелома в период 1988-1994 гг. [Tsyplenkov et al., 2021]. При этом синхронность изменений указывает на доминирование влияния изменений природных факторов на *SSY* при подчинённой роли антропогенных, влияние которых в большей степени сказалось на стоке наносов некоторых рек предгорно-низкогорного пояса. Положительный тренд, выявленный для 1950-1980-х прошлого века, связан с активным таянием ледников, которое стимулировало развитие денудационных процессов в приледниковой зоне. Отрицательный тренд, установленный для последних 30-35 лет, в целом объясняется общим уменьшением водности рек данного региона, обусловленным сокращением ледникового питания из-за резкого снижения площади ледников. Каких-либо трендов изменений суммарного слоя осадков за этот период не выявляется. Необходимо подчеркнуть, что сеть метеорологических станций в высокогорном и среднегорном поясах Большого Кавказа достаточно разреженная.

**ПРОДОЛЬНАЯ (ПО ТЕЧЕНИЮ РЕК)
СМЕНА МОРФОДИНАМИЧЕСКИХ ТИПОВ РУСЛА
НА БОЛЬШИХ И КРУПНЕЙШИХ РЕКАХ И ЕЕ ПРИЧИНЫ***

М.А. Великанов [1958] указывал, подводя итоги «длительный, своей полувековой работы над излучинами речного русла» (с. 9), что «чем больше река по своим размерам, тем больше вероятность возникновения в ней разветвления струи и образование не одной, а двух (а иногда и трех) динамических осей» (с. 27)», «при возрастании ширины поток имеет все большие и большие возможности для своего динамического раздвоения ... В реках-гигантах ... мы чаще встречаем разбитый, чем сосредоточенный поток, который в общем суммарно, имеет направленность, близкую к прямолинейной» (с. 29), «... как правило, речной поток, по своим малым размерам не имеющий тенденции развития на рукава, всегда принимает в плане меандрическую форму ...», «чем больше водоносность (а значит и ширина) реки, тем развитие в ней меандров идет слабее» (с. 31), хотя при этом добавлено что «это правило имеет (редкие) исключения, например, на реке Миссисипи меандричными на некоторых участках довольно ясно выражена». Эти ставшие аксиматические представления подтверждаются значениями критерия квазиодно-

родности потока И.Ф. Караева [1975] $\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda}$ (здесь b_p и h – ширина

и глубина русла, $\lambda = \frac{2g}{C^2}$ – коэффициент гидравлических сопротивлений, C – коэффициент Шези), согласно которому при $\Theta > 9,5$ поток разделяется на несколько ветвей течения. К.М. Беркович [2004] показал, что Θ находятся в обратной зависимости от устойчивости русла; чем больше число Лохтина L или коэффициент стабильности русла Н.И. Маккавеева K_c , тем меньше величина Θ .

Последнее примечание очень показательно. Если учесть многофакторность русловых процессов, то причины меандрирования, разветвления или развития прямолинейных, неразветвленных русел и, соответственно, их смена по длине рек оказываются весьма сложными, и общее

© Чалов Р.С., 2023

* Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФ (проект 23-17-00065).

заключение – чем больше река, тем больше вероятность разветвления ее русла при всей его обоснованности, в реальной обстановке постоянно нарушается: отсюда, и Миссисипи имеет меандрирующее русло, меандрирует средняя Обь и большая часть нижнего Иртыша и т.д., а разветвление встречается иногда и на малых реках.

Обь ниже слияния Бии и Катунь имеет самое морфологически сложное параллельно-рукавное разветвление суммарной шириной до 3 км (его аналог – нижняя Лена, река в 6 раз большая по водоносности и в 9,5 раз по суммарной ширине); вниз по течению разветвления упрощаются, а ниже устья р. Чарыша сначала преобладают односторонние разветвления, перемежающиеся с извилистыми (меандрирующими) участками, где ширина русла сокращается до 0,5 км в межень. От Новосибирского гидроузла до устья р. Томи река образует сравнительно морфологически простые сопряженные, одиночные и односторонние разветвления, а от устья Томи до устья р. Ваха – активно меандрирует, периодически образуя пойменно-русовые разветвления, рукава которых образуют до 3-5 излучин каждый. На широтном участке средней Оби (до слияния с Иртышом) река разделяется на два равноценные рукава – правый собственно Обь (70% расхода воды и левый – протоки Юганская Обь, Бол. Салманскую и Неулеву (раздвоенное русло), оба рукава которого меандрируют, но излучины собственно Оби (правый, более многоводный рукав) осложнены разветвлениями второго порядка, встречаются прорванные излучины, чередующиеся с сопряженными и одиночными разветвлениями. От слияния с Иртышом река протекает вдоль правого коренного берега (Белогорский материк) на протяжении 325 км, образуя единый морфологически однородный участок – одиночные разветвления, чередующиеся с прямолинейными отрезками при ширине русла (без островов) не более 2 км. Ниже с. Перегрёбного ширина днища долины увеличивается до 40-60 км, и вплоть до устьевой области (г. Салехард) русло раздвоенное, с количеством основных рукавов, между которыми распределяется сток максимум 5 (не считая многочисленных пойменных протоков) причем левые рукава – Малая Обь, Тоготская Обь, Малая Горная Обь в основном меандрируют, тогда как правые – Горная и Большая Обь преимущественно разветвленные, имея относительно простые формы разветвлений. Это смена типа русла происходит на фоне 10-кратного увеличения водоносности реки – $Q_{\text{ср}}$ возрастает от 1150 м³/с на г.п. Фоминское (ниже слияния Бии и Катунь) до 12800 м³/с на г.п. Салехард.

Русло реки Иртыша в пределах России сначала меандрирует, но затем почти до устья р. Тары характеризуется одиночными и односторонними разветвлениями, после чего до слияния с Обью интенсивно

меандрирует, образуя: большие излучины, вершины которых касаются противоположных бортов долины, а между крыльями – прямолинейные «вставки»; крутые петлеобразные излучины, такие пересекающие все днище долины; «нормальные» сегментные и очень крутые ($r < 2,5b_p$) излучины, ширина пояса меандрирования которых составляет 1/2-1/3 ширины днища долины, стрела прогиба в 2-2,5 раза меньше, чем у больших излучин. При этом среднегодовой расход реки возрастает от 851 м³/с у г. Омска до 2830 м³/с в устье.

Широкопойменное русло Лены в среднем и нижнем течении исключительно многорукавное, образуя преимущественно сложные (до 28 км шириной) параллельно-рукавные разветвления. На остальном протяжении русло врезанное, часто также разветвленное, а в среднем течении, перед переходом к широкопойменному, образует протяженные (более 100 км) параллельно-рукавные разветвления, образованные вытянутыми (L_o/B_o – до 7-10) островами. Преимущественно разветвленным является врезанное русло Енисея; широкопойменное разветвленное имеется только между Саяно-Шушенским и Красноярским гидроузлами и ниже г. Красноярска. Много разветвлений во врезанном русле р. Алдана, нижнего Витима.

Приведенные примеры отражают большие разнообразие причин формирования того или иного типа русла. На верхней Оби сложная разветвленность связана с резким уменьшением уклонов, изменением формы транспорта и крупности наносов и малой устойчивостью русла; смена типа русла (ниже по течению) – с положением реки вдоль коренного берега и увеличением устойчивости русла. Меандрирование реки после слияния с р. Томью – следствие многократного расширения днища долины и, как следствие, снижения величины удельного руслового расхода воды в половодье, когда до 40-60% стока рассредоточивается по широкой пойме и пойменным протоками. Дальнейшее увеличение размеров реки приводит к формированию раздвоенного русла на широтном участке среднего и нижнего течения, и лишь расположение реки у правого коренного берега ниже устья р. Иртыша обуславливает формирование прямолинейного русла с одиночными разветвлениями в местных его расширениях.

На р. Лене раздвоенное русло отсутствует, что связано с большой шириной русла и минимальной относительно шириной днища долины, лишь в 2-3 раза превышающей ширину русла (на средней и нижней Оби $B_r/b_p \approx 10-20$). При этом морфологическая сложность разветвлений на Лене при одном и том же типе русла (параллельно-рукавное) вниз по течению существенно возрастает, сочетаясь со снижением устойчивости русла.

Во врезанном русле, формирующемся в пластичных или полускальных грунтах (реки севера ЕТР – Северная Двина, Мезень, Печора) разветвленность такая же, как и в широкопойменных руслах, отличаясь от них лишь размерами островов (из-за большей удельной величины Q в русле). В скальных грунтах врезанные русла разветвляются в местных его расширениях, связанных с разломами, зонами повышенной трещиноватости и т.д. Параллельно-рукавное врезанное русло средней Лены сформировалось там, где река протекает по границе Лено-Алданского плато и Центрально-Якутской низменности.

Таким образом, изменение типов русла по длине рек определяется различными условиями их формирования, отражая многофакторность русловых процессов, дискретность развития и морфологических проявлений на разных структурных уровнях, водоносностью рек и особенностями водного режима, стоком наносов, направленностью и темпами вертикальных русловых деформаций. При этом общий фактор – водоносность реки (чем больше ее размер, тем вероятнее разветвленность русла), будучи определяющим вследствие законов речной гидравлики, интегральным выражением которых в данном случае является критерий квазиоднородности потока И.Ф. Карасева, затушевывается большим количеством других условий и факторов и в чистом виде проявляется только в условиях свободного развития русловых деформаций, при прочих равных и относительно слабой устойчивости русла. Такими условиями и факторами являются ширина пойменных разливов, особенно при прохождении руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме, что отражается на величине удельного расхода, сосредоточенного в русле и собственно отвечающего за формирование того или иного типа русла, наличие или отсутствие ведущих коренных берегов, вдоль которых проходит русло, и, наконец, величина стока наносов и соотношения в нем взвешенной и влекомой составляющих.

Р.С. Чалов, А.А. Куракова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

СПЕЦИФИКА МЕАНДРИРОВАНИЯ БОЛЬШОЙ РАВНИННОЙ РЕКИ (НА ПРИМЕРЕ р. ИРТЫША)*

Специфика распространения по длине р. Иртыша морфодинамических типов русла заключается в том, что на фоне увеличения водности реки в 3,3 раза происходит смена разветвления русла, характерного для среднего течения, где преобладает ограниченные условия формирования или близкие к ним (адаптированное и врезанное русло), меандрирующим для всего нижнего течения. Это не соответствует общепринятым представлением, которые наиболее четко были сформулированы еще М.А. Великановым [1958]: «Чем больше река по своим размерам, тем больше вероятность возникновения в ней разветвления струи и образование не одной, а двух (а иногда и трех) динамических осей (с. 27), «поток имеет все больше и больше возможности для своего динамического раздвоения» (с. 29) и «чем больше водоносность ... реки, тем развитие в ней меандров идет слабее» (с. 31). Русло Иртыша не только становится в нижнем течении извилистым, но характеризуется наиболее сложными петлеобразными, пальцеобразными и вообще крутыми излучинами, с нарушением условий безотрывного обтекание потоком берегов реки на излучинах – $r < 2,5b_p$ (правила Миловича [Маккавеев, 1955]). Последние на р. Иртыше, получившие местное название «повороты», чаще встречается в нижней части нижнего течения реки, ближе к слиянию с р. Тоболом и ниже его, где среднегодовой расход возрастает в 1,6 раза. При этом для Иртыша, как и для некоторых других больших рек, отсутствует зависимость параметров излучин (в частности, радиусов кривизны r) от величины характерного расхода воды [Завадский, 2001; Чалов и др., 2004], типичная для меандрирующих рек. Правда, М.М. Гендельман [1988] обнаружил, что шаг излучин закономерно возрастает вниз по течению выше устья р. Тобола (включая казахстанскую часть) до 2000 м, ниже устья – до 3300 м.

Вторая особенность меандрирования русла р. Иртыша – достаточно четкое развитие излучин на двух структурных уровнях [Чалов., С. Чалов С., 2022]: «нормальные» излучины, у которых пояс меандри-

© Чалов Р.С., Куракова А.А., 2023

* Выполнено по плану НИР кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (проект 23-17-00065)

рования B_m (сумма стрел прогиба смежных излучин) в 2-3 раза меньше ширины днища долины B_d , и «большие», петлеобразные и пальцеобразные излучины с $B_m = B_d$, вследствие чего вершины смежных излучин касаются противоположных бортов долины. Петлеобразные излучины представляет собой комбинацию из трех «нормальных» сегментных излучин, из которых верхняя и нижняя составляет ее крылья излучин (в ряде случаев одно из крыльев – прямолинейное). Критерием перехода от «нормальных» к большим излучинам в первом приближении для Иртыша можно принять величину стрелы прогиба $h_n = 2000-3000$ м, т.е. $h_n = B_m = B_d$.

Отсутствие зависимости параметров излучин от расхода воды в реке, очевидно, объясняется постоянным двух-пятикратным изменением ширины днища долины, несмотря на то, что русло почти повсеместно широкопойменное ($B_n > 3-4b_p$). Вследствие этого в многоводную фазу режима из-за разлива реки величина удельного расхода воды, проходящего по руслу (русловой расход), снижается и изменяется по длине реки в широких пределах. К этому добавляется возникновение периодического подпорных условий из-за крутых подходов реки к коренным берегам и расположения вершины и нижнего крыла излучин его вдоль них. Наиболее крутые излучины («повороты») – вынужденные, и во время половодья благодаря «навалу» потока на коренной берег (сбойному течению возле него) поток в верхних крыльях таких излучин испытывает особенно сильный подпор, и здесь формируются одиночные разветвления.

Формирование разветвлений в верхних крыльях излучин, на прямолинейных «вставках» между смежными большими излучинами и в привершинных частях крутых излучин – еще одна специфическая особенность меандрирующих русла Иртыша, хотя причина образования островов разная: подпор потока в верхнем крыле излучин, поперечное пересечение направлений пойменного и руслового потоков между смежными «большими» излучинами и нарушение условий безотрывного обтекания берегов. Во всех случаях образуются местные расширения русла) в которых возникает осередки и острова. В любом случае наличие острова на реке обуславливает рассредоточение стока и вносит определенное коррективы в деформации русла.

Переформирования меандрирующего русла нижнего Иртыша заключаются в преимущественно продольном смещении «нормальных» и «больших» излучин, в процессе которого размывы вогнутых берегов в нижних их крыльях сопровождаются формированием побочной у противоположных выпуклых; одновременно происходит поперечное

смещение вследствие размывов берегов в привершинной части излучин, частично захватывающей верхнее крыло. В результате со временем излучины искривляются и уменьшаются их r и L , растет степень развитости l/L . На излучинах, у которых $l/L > 1,4$ в привершинных частях нередко формируются острова, отделенные от шпоры излучины протоками, спрямляющими излучины. Их водность иногда достигает 10-15%. Генезис разветвлений двоякий: это или отчленение привершинной части шпоры излучины вследствие развития через них спрямляющего рукава, или при $r < 2,5b_p$ вследствие смещения стрежня потока к выпуклому берегу, его размыва, образования местного расширения русла и осередка в нем, со временем превращающегося в элементарный остров.

Наиболее серьезные переформирования связаны со спрямлениями петлеобразных излучин в основном благодаря встречному размыву берегов на их крыльях, представленных «нормальным» сегментными излучинами. Но есть примеры превентивного искусственного спрямления разработкой канала через шейку излучин. Ниже устья р. Тобола, где руслоформирующий расход проходит при затопленной пойме, часто встречающиеся прорванные излучины, формирующиеся в результате спрямления крутых сегментных излучин. Однако в спрямляющий рукав не всегда происходит перераспределение стока, и он в ряде случаев остается относительно маловодным. Это происходит, если новый спрямляющий рукав формируется за плечом коренного ведущего берега, направляющего поток в старое русло.

Еще одной особенностью меандрирующего русла Иртыша является формирование вынужденных и сундучных излучин. Последние представляет собой комбинации из вынужденной излучины на подходе реки к коренному берегу, прямолинейного русла вдоль него и адаптированной излучины, где русло отклоняется в сторону поймы. Обычно вынужденная излучины, и одиночная, и как составил часть сундучных, отличается наибольшей крутизной, и в их привершинных частях или в верхних крыльях формируются осложняющее их морфологию разветвления.

А.Н. Червань¹, Ю.С. Давидович²
*¹Белорусский государственный университет,
²Институт мелиорации НАН Беларуси*

ОЦЕНКА ПОСТМЕЛИОРАТИВНОЙ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТОВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Полесский регион Беларуси отличается широкомасштабным гидромелиоративным освоением сельскохозяйственных земель. Осушенные земли составляют в составе сельскохозяйственных предприятий более 50 % общей площади обрабатываемых участков. Несмотря на изначально высокую однородность почвенного покрова мелиоративных систем, долгий период сельскохозяйственного использования земель привел к значительному увеличению контрастности почв по степени гидроморфизма и влагоудерживающей способности, предопределяемых особенностью формирования влагоупора в почвенном профиле, мощностью, ботаническим составом торфа и другими генетическими факторами. Из 2,2 млн. га всех осушенных земель, лишь 0,7 млн. га (~ 30 %) занимают мелиоративные системы с двусторонним регулированием водного режима, что на фоне глобальных изменений климата и тесной связи агроценозов с метеорологическими условиями указывает на высокие экологические риски проявления ветровой эрозии автоморфных и полугидроморфных почв в зоне влияния осушительной сети.

В докладе представлены результаты исследований динамики увеличивающейся неоднородности почвенного покрова за 50-летний период одной из наиболее крупных мелиоративных систем Полесья – «Парохонск» в Пинском районе Брестской области. В 1979 г. данное агропредприятие признано лучшим во всесоюзном соревновании, что подтверждается структурой землепользования, восстановленной по данным дистанционного зондирования. Весь комплекс геостатистического анализа выполнен в среде ГИС с использованием данных аэрофотосъемки и спектральной многозональной космической съемки.

В границах рассматриваемой мелиоративной системы динамика неоднородности почвенного покрова оценивалась с позиций изменения структуры землепользования и комбинаций почвенных разновидностей. Для девяти репрезентативных массивов (площадью 130-650 га), в которых структура используемых земель за период 1974-2022 гг. отличается разной степенью интенсивности, выполнена дифференциация почвенных условий по группам уязвимости к проявлению дефляции вследствие недостаточного количества влаги за вегетационный период.

В качестве меры (оценки) влагообеспеченности почвы определенного генезиса и гранулометрического состава было принято число дней за год или за вегетационный период, в течение которых содержание влаги в слое 0-20 см превышает уровень предельной полевой влагоемкости и ниже влажности разрыва капиллярной каймы (значимые почвенно-гидрологические константы). Процентное соотношение групп уязвимости за каждый временной интервал позволило выполнить расчет соответствующих площадей, обнаружить тренды изменения неоднородности (произведения контрастности и расчлененности) почвенного покрова и соотнести их с разной интенсивностью землепользования. Приемы автоматизированного дешифрирования снимков по модифицированным индексам влагозапаса в почве позволили обеспечить статистическую значимость выделяемых групп уязвимости за период март-май 1986, 1989, 1991, 1999, 2000, 2001, 2003, 2018 и 2022 гг. С использованием картографической алгебры в программном комплексе для части репрезентативных массивов земель обнаружено устойчивое увеличение доли дефляционноопасных почв в условиях интенсивных агротехнологий и отсутствия двустороннего регулирования водного режима. Выполненные исследования подтвердили целесообразность применения соответствующих индексов при обработке ДДЗЗ, так как позволили идентифицировать долговременные тренды изменения неоднородности почвенного покрова с учетом структуры землепользования и оценить опасность проявления дефляции в агроландшафтах.

А.В. Чернов¹, А.С. Завадский¹, Е.К. Губарева²

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

²*Московский городской педагогический университет*

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЙМЫ р. СУНГАЧИ*

Долина р. Сунгачи расположена на заболоченной Приханкайской низменности, сформировавшейся в пределах Уссури-Ханкайской впадины в результате озерного и аллювиального седиментогенеза, развивающегося в условиях трансгрессивной аккумуляции при тектоническом погружении впадины и неоднократных колебаниях климата в четвертичное время. Во время озерных трансгрессий происходила ин-

© Чернов А.В., Завадский А.С., Губарева Е.К., 2023

* Выполнено по планам НИР научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00065)

тенсивная аккумуляция озерных отложений, а следовавшие за ними регрессии приводили к эрозионному расчленению образовавшихся ранее аккумулятивных толщ и формированию речных долин. Гидрографическая сеть в пределах Приханкайской низменности сформировалась в современном виде к позднему голоцену. В конце суббореального периода восточный берег озера находился в 20-25 км восточнее своего современного положения. На ранних этапах существования озера сток из него осуществлялся, через систему рек, расположенных южнее: Илестую, Абрамовку, Михайловку, Раковку, Раздольную. Ныне две первые реки относятся к бассейну оз. Ханка, остальные принадлежат бассейну р. Раздольной. Как альтернатива южному направлению около 3-4 тысяч лет назад была разработана новая ложбина стока из оз. Ханка – на северо-восток, в бассейн реки Уссури. Так возникла река Сунгача, ныне вытекающая из озера.

Условия формирования русла р. Сунгачи являются свободными и не ограничивают горизонтальные русловые деформации, заключающиеся исключительно в меандрировании ее русла. Пойма р. Сунгачи, представляющая все днище долины, двусторонняя, сегментно-гравистая, шириной – от 1,5 до 4 км, что в 30-100 раз превышает ширину русла (40-50 м). Пойменные берега реки низкие, высота их в верхнем течении 0,5-2,0 м, к низовью возрастают до 1,5-3 м. Сложены пойменной фацией аллювия – преимущественно средними и легкими суглинками.

На поверхности поймы сохранились следы древних положений русла, представленные извилистыми староречьями – сериями последовательно расположенных друг за другом изогнутых стариц, потерявших связь с современным руслом. Эти староречья подчеркивают, что в течение всего периода своего существования река интенсивно меандрировала. По взаимной ориентировке грав и стариц было выделено пять (включая современную) разновозрастных участков поймы (генераций), как бы вложенных друг в друга. Анализ морфологических характеристик и взаимного расположения выделенных палеоизлучин свидетельствует о постепенном увеличении кривизны древнего русла Сунгачи, сохранившегося в виде староречий, при переходе от 5-й генерации, которая формировалась на начальном этапе развития долины Сунгачи к более молодым массивам поймы (табл. 1). Коэффициент извилистости русла менялся от 1.5 на 5-й (древнейшей) пойменной генерации до 2.0 у современного русла.

Таблица 1. Изменения средних значений степени развитости стариц на разновозрастных пойменных генерациях

Пойменная генерация	Степень развитости стариц
5	1,5
4	1,8
3	1,8
2	1,9
1 (современные излучины)	2,0

В соответствии с известной гидролого-морфологической зависимостью ($r = f(Q)$) увеличение кривизны излучин свидетельствует о постепенном уменьшении расходов воды в реке и врезании русла. Площадь поймы 5-й генерации заметно превышает площади более молодых генераций поймы. Всё это свидетельствует о высокой активности процессов формирования поймы и, следовательно, о высокой интенсивности процессов руслоформирования и продолжительности затопления поймы в первые периоды развития долины реки и постепенном её снижении при концентрации стока в бровках русла.

Возможно, в начале развития восточного направления сток ханкайских вод осуществлялся несколькими рукавами одновременно, либо положение русла Сунгачи в районе истока было крайне неустойчиво, и поток блуждал по осушающемуся днищу озера. Следы этого блуждания как севернее современного русла реки, так и южнее, хорошо сохранились в верхней части долины в виде сухих извилистых староречий; они сопровождают Сунгачу на протяжении 28 км от ее истока и заканчиваются только на уступе древней береговой линии оз. Ханка, маркирующим высокое стояние его уровней.

Дальнейшая эволюция русла р. Сунгачи на протяжении субатлантического периода также отражается в рельефе 4-й, 3-й и 2-й генераций её поймы, образование которых можно отнести к началу и середине субатлантического периода. На них широко распространены старицы излучин, имевших омеговидные, заваленные, синусоидальные формы. Из таблицы видно, что кривизна стариц, маркирующих положение русла Сунгачи во время формирования этих пойменных генераций, была выше, чем на более ранних этапах развития реки. Это говорит о постепенном снижении общей водности реки, что можно увязать с продолжавшимся на протяжении всего позднего голоцена понижением уровней воды в питающем реку оз. Ханка и направленным врезанием самого русла. Бровки старичных озер 3 и 4-й пойменных генераций расположены ниже абсолютных отметок стариц 5-й генерации.

Причины, обусловившие сокращение горизонтальных русловых деформаций вплоть до их полного прекращения на Сунгаче, носят, по-видимому, не природный, а антропогенный характер и вызваны пре-

кращением дноуглубительных работ в истоке реки, где возник обширный мелководный бар, и расчистки всего русла от излишка наносов и стволов попавших туда деревьев.

А.Г. Шарифуллин, О.А. Лаврова, А.М. Гафуров, А.В. Гусаров
Казанский (Приволжский) федеральный университет

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ БОБРОВЫХ ПЛОТИН И ПРУДОВ НА МАЛЫХ РЕКАХ СЕВЕРА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ*

В последние десятилетия малые реки испытывают активное влияние деятельности бобров (*Castor fiber*), которое проявляется в строительстве плотин и связанных с ними прудов. Это приводит к уменьшению скорости потока, снижению стока воды, аккумуляции наносов и связанных с ними загрязняющих веществ вдоль русел и пойм этих рек, а также преобразованию пойменных ландшафтов. Повышение популяции бобров и освоение ими участков русел рек иногда приводит также к подтоплению населенных пунктов, сельскохозяйственных полей и объектов инфраструктуры. Учитывая тот факт, что вблизи малых рек проживает значительная часть населения, появляется острая необходимость выявления гидрологической роли бобровой деятельности.

Проведен анализ закономерностей распределения бобровых плотин и прудов на основе топографической съемки и съемки с БПЛА речного русла, зарегулированного бобрами на примере малой реки Морквашинка (с длиной около 16,6 км) – одной из типичных по своему геоморфологическому строению и гидрологическому режиму рек севера Приволжской возвышенности.

Топографическая съемка долины реки Морквашинка была произведена методом спутникового позиционирования (ГНСС-приемник Trimble R12i). На отдельных участках использовался электронный тахеометр Trimble M3 DR 5" и беспилотный летательный аппарат (БПЛА) DJI Phantom 4 PRO V2, оснащенный камерой DJI FC6310S. По результатам съемки были получены продольный профиль реки, местоположение плотин и их характеристики.

На продольном профиле реки Морквашинка были выделены три участка, ясно различающиеся по уклону русла: участок с малыми уклонами (со средним уклоном 3.6 м/км, или 0.36%), который охватывает нижнее течение и нижнюю часть среднего течения реки; участок со

© Шарифуллин А.Г., Лаврова О.А., Гафуров А.М., Гусаров А.В., 2023

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 22-77-10087).

средними уклонами (11.5 м/км, или 1.15%), включающий верхнюю часть среднего течения реки; и участок с относительно большими уклонами (65.2 м/км, или 6.52%) – верхнее течение реки. На данные участки приходится, соответственно, 71%, 23% и 6% всей длины реки, что хорошо отражает общий вогнутый профиль подобных малых рек региона исследования.

Суммарная протяженность запруженного бобровыми плотинами русла реки Морквашинка составляет 7.98 км (48%), на русло в естественном состоянии остается 8.6 км (52%). На первом и втором участках бобровой деятельностью преобразовано, соответственно, 52% и 49% их длины; на третьем участке такого преобразования мы не отмечаем.

В сухом (на момент работ летом и осенью 2022 г.) русле р. Морквашинка помимо естественного русла, сложенного сравнительно грубым аллювием (карбонатный валунно-щебнистый материал), также выделяются запрудные участки с заброшенными и разрушенными плотинами, которые идентифицируются по наличию сохранившегося сравнительно тонкозернистого наилка (мощность местами до 2 м и более). Такие участки занимают около 16% от суммарной длины всего русла реки.

Общее количество действующих бобровых плотин вдоль всего русла реки составляет 61 единиц. Из них 32 плотины (53%) расположены на участке русла реки с малыми уклонами, а 29 (47%) – со средними. Кроме того, 7 плотин (12%) на среднем и нижнем участках выявлены в пределах осушенного русла. Средняя плотность плотин на р. Морквашинка составляет 3.7 ед./км, изменяясь по отдельным участкам русла от 0 до 7.6 ед./км. Наибольшее значение плотности плотин наблюдается на участке со средними уклонами русла.

Среднее расстояние между бобровыми плотинами на участке русла с малыми уклонами составляет 160 м, на участке со средними уклонами – 50 м. В целом на нижнем участке размеры плотин и прудов несколько выше, чем на среднем участке. Подавляющее большинство прудов располагается в границах русла реки, и лишь крайне небольшое их количество захватывает также низкую и частично высокую поймы реки.

Выявленные закономерности размещения бобровых прудов в целом характерны не только для малых рек региона исследования, но лесной зоны Верхневолжской равнины, Европы и Северной Америки. Полученные результаты пока носят предварительный характер и в дальнейшем планируется проведение исследований по другим малым рекам Среднего Поволжья, бассейны которых расположены в разных ландшафтных и геоморфологических условиях.

Д.И. Школьный

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

ОЦЕНКА НАРУШЕННОСТИ РЕЧНОЙ СЕТИ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССЫПНЫМИ РАЗРАБОТКАМИ*

Для территории водосборов рек Дальнего Востока – от п-ова Хара-Тумус (Хатангский залив) до границы России и КНДР (р. Туманная) была создана база данных, содержащая информацию об участках нарушенных открытой горной добычей долин по состоянию на 2022 г. – их длину, тип разработки в пределах долины, принадлежность к речному бассейну, степень рекультивированности и воздействия на сток воды и наносов. Для замыкающего створа каждого участка рассчитана площадь водосбора (на основании гидрологически корректной ЦМР MERIT) и среднегодовой расход воды (по данным глобальной гидрологической модели WaterGAP), что позволило оценить затронутость для водосборов отдельных рек.

Общая длина нарушенных участков долин составила 20,1 тыс. км², что составляет 0,48% от всей длины речной сети региона. Основная доля нарушений приходится на малые водотоки в верхних звеньях речной сети, однако наблюдаются и значительно измененные (за счет использования драг) участки более крупных рек – Тимптона, Селемджи, Аллах-Юня, Неры. Наибольшее воздействие наблюдается в бассейнах Амура, Колымы и Лены, где затронуто 1,14, 0,9 и 0,52% длины речной сети, соответственно. Среди средних рек территории (с площадями бассейнов от 20 до 50 тыс. км²) наиболее затронуты бассейны Ципы, Жуи, Большого Патомы, Тимптона, Айма, Аллах-Юня, Ингоды, Гилюя.

Помимо изменения ландшафта, воздействие разработок проявляется в изменении стока воды и наносов, степень которого может значительно изменяться в зависимости от времени, прошедшего после окончания активной фазы добычи и от величины реки. Согласно литературным данным, измерениям на реках разного масштаба (Нижняя Яна, Вывенка, Уоргалан, Сутара, реки Монголии) показали значительное воздействие на сток и биоценоз малых рек и постепенное уменьшение воздействия с увеличением водности реки. При этом, трансформация стока наносов наиболее ярко проявляется в период половодья (за счет плоско-

© Школьный Д.И., 2023

* Выполнено по плану НИР (ГЗ) госзаданию кафедры гидрологии суши МГУ имени М. В. Ломоносова (№ 121051400038-1) при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00065).

стного смыва), а стока воды – в межень (за счет накопления технологической воды на действующих участках). При значительных масштабах открытой добычи в бассейнах в принимающих водотоках повышаются содержание мелких фракций наносов и концентрации отдельных химических веществ, в основном – тяжелых металлов. Основным экологическим последствием открытой добычи является деградация рыбных запасов, для экономики и жизнедеятельности Дальнего Востока являющихся важнейшим ресурсом. Интегральным показателем такого воздействия может быть доля площадей бассейнов, лежащих выше участков добычи по течению. Она составляет 4,6% площади региона, в том числе – 4,1% от бассейна Лены, 10% от бассейна Индигирки, 9,1% от бассейна Колымы и 9,7% бассейна Амура. Ближе к верховьям водосборов доля затронутой площади может значительно возрастать, достигая 34,5% для Колымы выше плотины Колымской ГЭС, 16,2% для Онона, 16,9% для Зеи. Доля расходов воды выше замыкающих створов разработок составила 4,16% от общего расхода воды территории.

Помимо влияния разработок на фоновые показатели стока наносов, связанные с увеличением темпов русловых деформаций и смывом с поверхности отвалов, значительное воздействие оказывают залповые сбросы. Они могут происходить как в ходе технологического процесса (из-за недостаточной очистки оборотной воды), так и при аварийных ситуациях (прорывах дамб и отстойников), распространенных на отработанных участках из-за отсутствия надлежащей рекультивации. При составлении базы данных сбросы были обнаружены на 13% участков добычи, наибольшая их частота приурочена к территориям активной современной добычи – верхней Зее, Чаре, Витиму.

Первичная обработка большинства месторождений проводилась более 50 лет назад, в связи с чем современное их влияние на сток воды и наносов зависит от конфигурации техногенного рельефа на каждом конкретном участке, фоновых скоростей деформаций и амплитуды уровня. Закрепление откосов отвалов и руслоотводных канав растительностью значительно уменьшает темпы смыва, однако скорости естественной рекультивации значительно различаются в пределах исследуемой территории. Заращение наблюдается на 22% участков добычи, достигая максимальных значений (>90%) в увлажненных областях юга Дальнего Востока (бассейны Амгуни, Уссури, Японского моря) и уменьшаясь со снижением влажности климата (вверх по течению Амура и с увеличением широты местности) до менее чем 6% на побережье Северного Ледовитого океана и в бассейне Аргуни.

К ВОПРОСУ О ВКЛАДЕ БАСЕЙНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ОБЩИЙ СТОК НАНОСОВ

Основными факторами, определяющими поступление продуктов почвенной эрозии в речную сеть, являются физико-географическая расположенность речного бассейна, типы его подстилающей поверхности, антропогенная нагрузка и пространственное расположение наиболее эрозионно активных частей водосбора, на которых формируется основная масса наносов, поступающих в русло водотока. Вклад русловой и бассейновой составляющей в твердом стоке рек обусловлен, прежде всего, гранулометрическим составом почво-грунтов, донных отложений и транспортируемых из верхнего створа наносов. Вклад бассейновой и русловой составляющих в общий сток наносов весьма изменив в своем внутригодовом распределении, зависит от водности года и от интенсивности и характера антропогенной нагрузки на водосборе и русле реки. В зависимости от фазы водности (летняя и зимняя межень, половодье и паводки), меняется и транспортирующий потенциал речного потока, его способность переносить твердое вещество. При этом с увеличением водности в период, например, паводка, возрастание транспортирующего потенциала потока сопровождается интенсивным поступлением продуктов почвенной эрозии с поверхности водосбора. Все это определяет процессы аккумулятивно-эрозионную деятельности речного потока по отношению к руслу как крайне неоднозначную. Разделение твердого стока на русловую и бассейновую составляющую возможно сопоставлением минералогического, гранулометрического, геохимического состава почвообразующих грунтов речного бассейна и руслообразующих грунтов, а также радиоизотопным методом, оценкой магнитных свойств минералов, и методами математического моделирования процессов почвенной эрозии и двухфазного массопереноса в русле. Также для решения этой задачи может быть использован гидрологический подход. Выделение бассейновой доли в общем составе наносов по минералогическому и гранулометрическому составу возможно лишь при условии того, что русловые наносы по этим характеристикам принципиально отличаются от почвообразующих грунтов на водосборе. В случае относительно однородного состава руслового и бассейнового грунта для антропогенно освоенных

водосборов хороший результат в оценке вклада исследуемых компонентов даст сопоставление химического состава грунта.

В институте Озероведения РАН разработана математическая модель русловой и бассейновой компонентов твердого стока водотоков. В основе модели лежит оценка транспортирующего потенциала водотока и динамика кривых гранулометрического состава донных отложений, продуктов почвенной и русловой эрозии. В зависимости от гидравлических условий на всем протяжении водотока меняется и его транспортирующий потенциал. Последнее приводит к инициации эрозионно-аккумулятивных процессов, или, другими словами, перераспределению твердого вещества в речном русле. Поступающие на всем протяжении русла продукты почвенного смыва с водосборной территории оказывают непосредственное влияние на динамику перераспределения твердого стока и донных отложений. Модель позволяет оценить профиль изменения отметок дна между двумя расчетными створами (формируется за счет последовательного осаждения или взмыва частиц грунта в соответствии с распределением их крупности); распределение крупности осажденных или пришедших в движение частиц; массу частиц русловой и бассейновой составляющей стока наносов; долю вклада бассейновой компоненты. При этом, расчет динамики кривых распределения гранулометрического состава строится на принципиальном различии в гранулометрическом составе руслоформирующих и почвообразующих грунтов. При схожей крупности последних возможна лишь оценка изменения профиля отметок дна и изменения состава общей гранулометрической кривой транспортируемых речных наносов.

**Xiaolan Chen¹, Sha Lou^{1,2}, Shuguang Liu^{1,2}
L.D. Radnaeva³, E. Nikitina³, I.V. Fedorova⁴**

¹Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, China, ²Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, China, ³Laboratory of Chemistry of Natural Systems, Baikal Institute of Nature Management of Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Russian, ⁴Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF VEGETATED FLOW AROUND THE CHONGMING DONGTAN WETLAND, YANGTZE RIVER ESTUARY*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЙМЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОТОК В ПРЕДЕЛАХ ПОЙМЫ ЧУНМИН ДУНТАНЬ, ЭСТУАРИЙ РЕКИ ЯНЦЫ

INTRODUCTION

In recent years, hydrodynamics influenced by vegetation has been paid much attention, and the interaction of flow and vegetation has been studied by several numerical simulations. Delft3D model was used by Hu et al. (2015) to reveal the influence of wetland vegetation on flow structure and turbulence characteristics under storm surge conditions in Breton Sound, a semi enclosed bay in Louisiana, USA. It was found that the maximum surge was decreased by vegetation and the reduction rate was increased with the growing vegetation height and rhizome density. In this paper, taking the Chongming Dongtan Wetland as study region, influences of seasonally vegetation features (height, stem diameter, density) on hydrodynamics were analyzed through numerical simulation based on Delft3D model. The focus of this paper is to study the interaction between flow and vegetation in different growth phenophases.

MODEL ESTABLISHMENT AND VALIDATION

2.1. Model Establishment

Vertically, the study region of the model was divided into seven sigma layers, of which thicknesses were 14.2%-14.3% of the total water depth. Horizontally, the grid resolution was 0.005°. Topographical data were ob-

© Chena Xiaolan, Lou Sha, Liu Shuguang, Radnaeva L.D., Nikitina E., Fedorova I.V., 2023

* This study was funded by the National Natural Science Foundation of China (42072281), Shanghai Innovation Action Plans (20230742500, 22ZR1464200, 22230712900), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (22120210576), Top Discipline Plan of Shanghai Universities-Class I (2022-3-YB-03), and Interdisciplinary Project in Ocean Research of Tongji University (2022-2-YB-01).

tained from the combination of measured data (China, 2018) and information from the official website of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The open boundaries adopted the daily discharge at Xuliujing and the harmonic constant derived from the global tidal model TPXO8.0.

2.2. Parameter Settings

The simulation times were summer from August 11 to 16, 2018, and winter from December 3 to 8, 2018. The time step was 0.5 min, which met the condition of the Courant-Friedrichs-Lewy number (CFL). The model adopted a cold start, the initial water level was 1.875 m according to the calculation results, and other initial conditions were all set to 0. Referring to the study of Xie et al. (2013) and model calibration, the Manning coefficient in non-vegetation area was 0.0135.

There are three major vegetation communities in the coastal wetlands of the Yangtze River (i.e., *Scirpus mariqueter*, *Spartina alterniflora* and *Reed*). In order to analyze the impact of biophysical characteristics (density and height) on flow, four numerical cases with different vegetation characteristics were carried out, as shown in Table 1.

Table 1. Vegetation settings of four cases

Season	Case	Vegetation Type
Summer	Case-a	<i>Scirpus mariqueter</i> , <i>Spartina alterniflora</i> and <i>Reed</i>
	Case-b	Control test without vegetation
Winter	Case-c	<i>Spartina alterniflora</i> and <i>Reed</i>
	Case-d	Control test without vegetation

2.3. Model Validation

The calculated data or graphics used in this paper were generated by reprocessing tool of Delt3D. Water level and flow velocity at specific stations were selected to verify the model using observed data which were from Yangtze Estuary Hydrology and Water Resources Survey Bureau. Locations of these station are shown in Fig. 1. The Root Mean Square Error (*RMSE*) and Consistency Index (*IA*) using equations (1) and (2) were used to evaluate the simulation results.

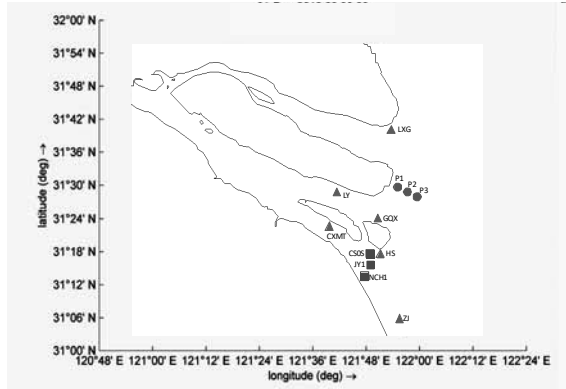


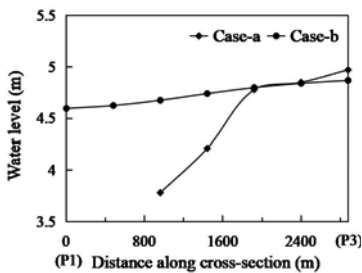
Fig. 1. Locations of verification stations

DISCUSSIONS

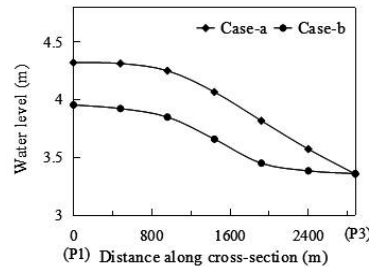
3.1. Water Level Affected By Vegetation

Select specific time and compare the water level changes between stations P1-P3 under cases a and b. Comparisons of calculated water levels in cases a-b during flood and ebb tide are shown in Fig. 2.

At high tide, the vegetated zones made it harder for the flood tide to enter wetland; at low tide, the vegetated zones raised water level, and the initial water level in the cases with vegetation were higher than that in the cases without vegetation. In addition, the vegetated zones increased water level attenuation rate. The water level decreased more with the vegetated cases than the non-vegetation cases for the same propagation distance of the falling tide.



(a) Flood tide in Summer
(16:00 on August 12, 2018)



(b) Ebb tide in Summer
(19:00 on August 12, 2018)

Fig. 2. Comparisons of calculated water levels in cases a-b during flood and ebb tide

3.2. Flow Velocity Affected By Vegetation

Time series change of vertical average flow velocities at P1, P2 and P3 stations are shown in Fig. 3. At all stations, the vegetated zones significantly reduced the magnitude of flow velocity and delayed the appearance of maximum flow velocity.

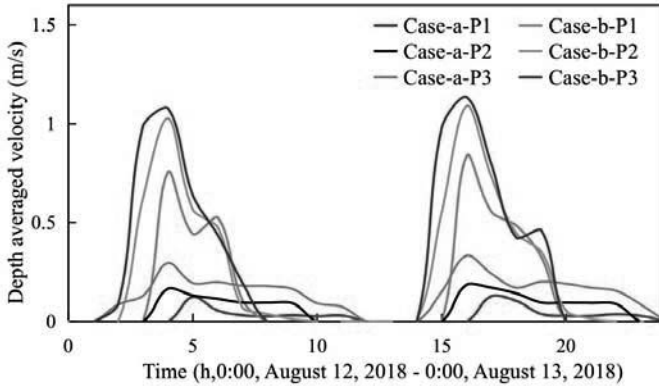


Fig. 3. Time series change of vertical average flow velocity at P1, P2 and P3 stations

3.3. Turbulent Kinetic Energy Affected By Vegetation

Turbulent kinetic energy changes at P1, P2 and P3 stations during flood tide are shown in Fig. 4. Horizontally along P3-P1, the turbulent kinetic energy gradually decreased from sea to wetland, which was due to the vegetation hindering the flood tide and dissipating the kinetic energy of flow. The vegetation stems increased the turbulent kinetic energy, especially near the bottom. Vertically from water surface to bottom layer, inflection points occurred in the distributions of turbulent kinetic energy. The turbulent kinetic energy nearing the bottom was larger than that near the surface. Comparing (a) and (b) of Fig. 4, it can be seen that the turbulent kinetic energy in summer was larger than that in winter, and thus the reduction of vegetation density can reduce the turbulent kinetic energy of the water.

CONCLUSIONS

Based on Delft3D model, a three-dimensional hydrodynamic model coupled with a vegetation module was established and validated using measured data. The hydrodynamic characteristics of Chongming Dongtan Wetland affected by vegetation in different seasons were analyzed in the simulations. Through the validation, it was proved that the model can simulate the hydrodynamic process of Chongming Dongtan Wetland with a certain accuracy. It was also found that the presence of vegetation had a large

influence on the water level. The vegetated zone hindered the flood tide, making it harder to enter the wetland. Vegetation dissipated the turbulent kinetic energy. The turbulent kinetic energy decreased gradually from sea to wetland which was consistent with the velocity distributions. The turbulent kinetic energy was larger near the bottom due to the wake caused by vegetation stem. Vegetation also delayed the time to reach maximum flow velocity.

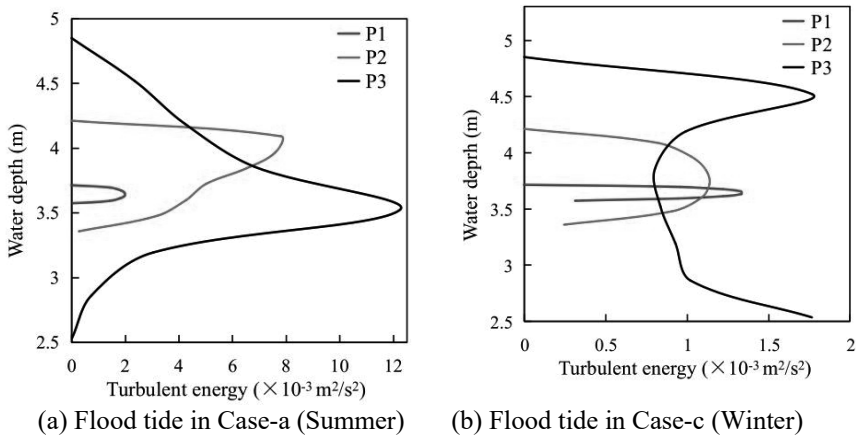


Fig. 4. Turbulent kinetic energy changes at P1, P2 and P3 stations during rising tide (The time of Case-a is 16:00 on August 12, 2018, the time of Case-c is 16:00 on December 7, 2018)

**Yuting Jin¹, Shuguang Liu^{1,2}, Guihui Zhong¹, Zhengzheng Zhou¹,
Qi Zhuang¹, Min Liu³, Jue Wang⁴**

¹ *Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai, China,*

² *Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, China,* ³ *Bureau of Hydrology (Information Centre), Taihu Basin Authority, Shanghai, China,* ⁴ *Yangtze River Water Resources Commission Hydrographic Bureau, Yangtze River Estuary Hydrographic and Water Resources Survey Bureau. Shanghai, China.*

NON-STATIONARY ANALYSIS AND ATTRIBUTION OF EXTREME RAINFALL IN THE YANGTZE RIVER DELTA REGION, CHINA*

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСАДКОВ В РАЙОНЕ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЯНЦЫ, КИТАЙ*

With the climate change and rapid urbanization, people's personal and property safety is seriously threatened by increasingly frequent natural disasters like climate events and extreme weather, fundamentally caused by hydrometeorological non-stationarity on the global scale. According to the 6th Assessment Report of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)[1], the frequency and intensity of extreme heat events have been increasing and the frequency and intensity of extreme cold events have been decreasing in the vast majority of the world since the 1950s. Research on the methods of non-stationarity identification and frequency analysis of hydrologic time series helps to form an accurate understanding of the current and future change rules of the hydrological process[2, 3]. The Yangtze River Delta region is located at the entrance to the Yangtze River in China with rapid urbanization in recent years. Flooding caused by increasing extreme rainfall has become one of the key problems affecting the development of this region.

In this paper, hence, using rain-gauge rainfall data from 1961 to 2020 and IMERG satellite rainfall from 2000 to 2020, non-stationary and frequency features of extreme rainfall in the Yangtze River Delta region, China

© Jin Yuting, Liu Shuguang, Zhong Guihui, Zhou Zhengzheng, Zhuang Qi, Liu Min, Wang Jue, 2023

* This research was funded by the National Natural Science Foundation of China (42271031) and Scientific Research Project of Shanghai Water Authority (Shanghai Water Science and Technology 2022-03). The authors would like to acknowledge the helpful comments of all reviewers without which the quality of the paper could not be improved.

are analyzed. The Mann-Kendall (MK) test and the Pettitt test are used to identify the trend changes and mutations of rainfall series in 8 water conservancy zonings of the Taihu Lake basin which located in the core of the Yangtze River Delta region[4-6]. (Figure 1.) The magnitude, intensity, and duration variability of extreme rainfall are analyzed based on extreme rainfall indicators – the number of heavy rainfall days (R10mm), very wet days (R95p), and the maximum 1-day rainfall amount (Rx1d).

As shown in Table 1. that the annual total rainfall of 88% water conservancy zoning in the Taihu basin have an overall increasing trend, and 37.5% rain-gauges amount them have mutations at a significant level of 0.05.

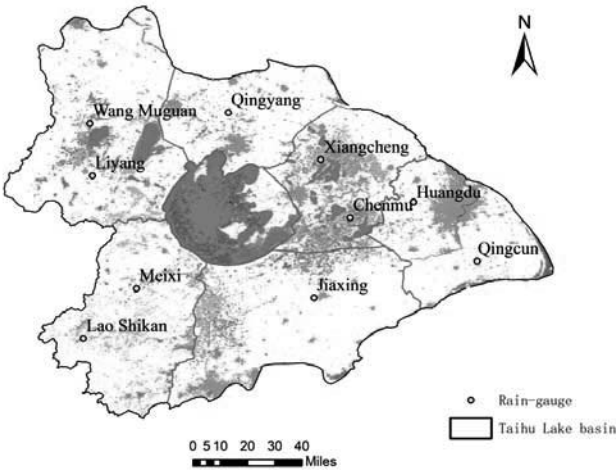


Fig 1. Distribution of rain-gauges in the the Taihu Lake basin which located in the core of the Yangtze River Delta region

Table 1. Non-stationary test for rain-gauge data in the Yangtze River Delta region

Rain-gauge	Trend	Chang Point	Significance test
Xiangcheng	increasing	1997	No Pass
Chenmu	increasing	1979	Pass
Meixi	increasing	1979	No Pass
Lao Shikan	increasing	2008	No Pass
Qingyang	increasing	2005	No Pass
Wang Muguan	no trend	2008	No Pass
Liyang	no trend	2008	No Pass
Jiaxing	increasing	1979	Pass

These non-stationary changes in rainfall have a close link to regional economic development. For instance, the rainfall series of Huangdu rain-gauges in Puxi zoning (i.e. Shanghai in this zoning is one of a megacity in China) have a significant change point in 1979, which coincides with the rapid development of urbanization in the region. However, the rainfall series of Liyang and Wang Muguan station in the Huxi district covered a large mountainous area has no significant mutation. The average frequency and intensity of heavy rainfall and extreme precipitation events in each water conservancy zoning have shown an overall upward trend over the past two decades with an overall pattern of decreasing extreme rainfall from south-west to northeast (Figure 2.)

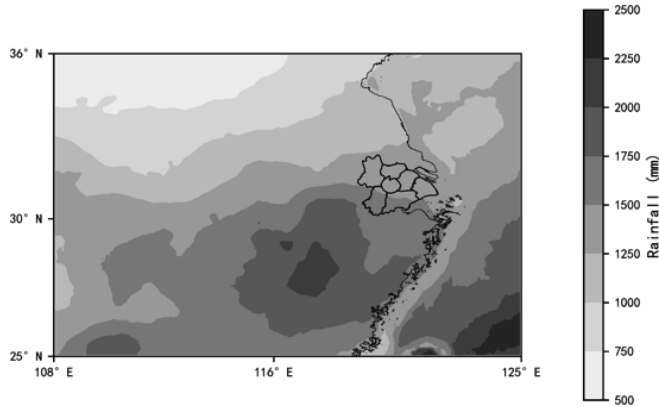


Fig. 2. Spatial and temporal distribution of average annual rainfall (2000-2020)

The R95p and Rx1d in 38% water conservancy zoning have shown an overall upward trend over the past two decades and a significant upward trend in the past five years. As non-stationary analysis for extreme rainfall indicators shown in Table 2. that the Rx15d of 60% water conservancy zoning in the Taihu basin have an overall increasing trend, and 50% rain-gauges amount them have mutations at a significant level of 0.05. Given non-stationary changes in rainfall, there are significant differences in the results of design storms in the basin Yangtze River Delta region.

The results of the study provide a reference for understanding the non-stationary variations of extreme rainfall in the Yangtze River Delta region, China. It also provides scientific guidance for flood control planning in the region that shared similar hydrometeorological characteristics under the changing environment.

Table 2. Non-stationary test or extreme rainfall indicators
in the Yangtze River Delta region

Rain-gauge	Rx1d			Rx7d			Rx15d		
	Trend	Chang Point	Significance test	Trend	Chang Point	Significance test	Trend	Chang Point	Significance test
Xiangcheng	increasing	2000	Pass	No trend	2000	No Pass	No trend	1988	No Pass
Chenmu	No trend	1984	No Pass	increasing	1982	Pass	increasing	1980	Pass
Meixi	No trend	1982	No Pass	increasing	1979	Pass	increasing	1979	Pass
Lao Shikan	No trend	2006	No Pass	No trend	2006	No Pass	No trend	2006	No Pass
Qingyang	No trend	1988	No Pass	increasing	1986	Pass	increasing	1986	No Pass
Wang Muguang	No trend	2010	No Pass	No trend	2008	No Pass	No trend	2008	No Pass
Liyang	No trend	1988	No Pass	No trend	2008	No Pass	No trend	2010	No Pass
Jiaying	No trend	1980	No Pass	increasing	1980	No Pass	increasing	1980	Pass
Huangdu	No trend	1982	No Pass	increasing	1982	No Pass	increasing	1980	No Pass
Qingcun	No trend	1994	No Pass	increasing	2004	No Pass	increasing	2006	No Pass

REFERENCES

1. Ipcc. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerab[R]. 2022.
2. *Gautam M.R, Acharya K.* Streamflow trends in Nepal[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2012, 57(2): 344-357.
3. *Liu X, Zhou Y, Lu Q, et al.* Method for determining anti-floating and anti-water level based on Mann-Kendall trend analysis, involves defining Mann-Kendall trend test statistic, calculating Z-value of Mann-Kendall trend analysis statistical variable: CN111877416-A[P].
4. *Kendall M.G.* Rank correlation methods, 2nd ed[J], 1955.
5. *Abramovitch L.* Nonparametrics: Statistical methods based on ranks : By E.L. Lehmann . San Francisco: Holden-Day, Inc. (1975) [J]. Animal Behaviour, 1979, 27(1): 634-635.
6. *Pettitt A.N.* A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2): 126-135.

**Zhihui Liu¹, Shuguang Liu^{1,2}, Guihui Zhong¹, Hejuan Lin³,
Min Liu³, Jue Wang⁴**

*, ¹ Department of Hydraulic Engineering,
Tongji University, Shanghai, China.*

² Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, China, ³ Bureau of Hydrology (Information Center) of Taihu Basin Authority, Shanghai, China, ⁴ Yangtze River Water Resources Commission Hydrographic Bureau, Yangtze, River Estuary Hydrographic and Water Resources Survey Bureau. Shanghai, China

NON-STATIONARY ANALYSIS OF CHANGES EXTREME TIDE LEVELS IN THE COAST CITY OF CHINA*

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ПРИЛИВОВ В ПРИБРЕЖНОМ ГОРОДЕ КИТАЯ*

In the prevention and mitigation of coastal zones, the design of flood control tide level is a very critical task. As a key parameter for design tide level calculation, maximum tide level is also an important basis for coastal engineering planning and design (Zervas, 2005). Due to the magnitude and ubiquity of the climate change and human activities, the stationary of tide level has changed in recent years (Bograd, 2023; Milly, 2008), which makes occurrence rules of hydrological extreme events more complicated especially in the coast cities.

Huangpu River is the largest river crossing the riverside coastal megacity of Shanghai in China, with a total length of 82.5 km. Due to its location at the forefront of the Yangtze River Delta and the relatively straight shape of its channel, Huangpu River is greatly affected by tidal action and other factors, which can easily cause significant changes in the tide level. Previous studies have shown that there was a non-stationary change of extreme tide level over the year and it mainly affected by sea level rise and typhoon frequency, especially precipitation and construction of hydraulic projects (Kai, 2021; Wang, 2018). At present, the research on the change of extreme tide level in the main stream of Huangpu River is far from enough.

Taking four representative level stations along the main stream of Huangpu River as the research stations, the non-stationary characteristics

© Liu Zhihui, Liu Shuguang, Zhong Guihui, Lin Hejuan, Liu Min, Wang Jue, 2023

* This research was funded by the National Natural Science Foundation of China (42271031) and Scientific Research Project of Shanghai Water Authority (Shanghai Water Science and Technology 2022-03). The authors would like to acknowledge the helpful comments of all reviewers without which the quality of the paper could not be improved.

involving tendency and change-point detection of the maximum tide levels during 1964-2021 at each station were researched by using Mann-Kendall trend test and Pettitt test, and the changing reasons were also discussed.

The test results at the significance level of $\alpha = 0.05$ were shown in Table 1, and the changes of annual maximum tide level at all stations presented a significant upward trend, with the significance level of test statistics was higher than the corresponding critical value $Z_{1/2} = 1.96$. It is apparent that the upward trend in maximum tide level at the upstream station exceed that at the downstream station. Specifically, at Mishidu Station, the annual maximum tide level rised at a rate of 19 mm/year, and it increases by 16 mm/year at Wujing Station, Meanwhile, the annual maximum tide level of Huangpu Park Station and Wusong Station increased slightly, with an average annual trend of 8 mm/year and 7 mm/year, respectively.

Table 1. Annual maximum tide level trend test results of each station.

Stations	Tendency		Mutation change
	Statistical value Z	Mann-Kendall test	Pettitt value p
Wusong	3.21	upward trend	2.12e-3
Huangpu Park	4.07	upward trend	2.89e-4
Wujing	6.85	upward trend	1.85e-7
Mishidu	7.82	upward trend	7.18e-9

The calculated statistics p corresponding to the change points of the annual maximum tide level sequence at Wusong Station, Huangpu Park Station, Wujing Station and Mishidu Station were all less than the significance level, indicating obvious mutations. As shown in Fig. 1, the mutation years of annual maximum tide level at Wusong Station was 1987, and the other three stations all mutated in 1988. But the tide level of upstream and downstream stations showed different trend of inconsistent change.

The tide level variation at Wusong Station followed a trend of initial increase and subsequent decrease, with an annual increase of 13 mm between 1964 and 1987, followed by a decrease of 4 mm/year after 1987. Similarly, the maximum tide level at Huangpu Park station also showed the same trend of change, although at a slower rate, increasing by 12 mm/year before 1988 and decreasing by 2 mm/year thereafter. However, prior to the change point, Wujing and Mishidu Stations experienced annual maximum tidal level increased rates of 18 mm/year and 21 mm/year, respectively, after which the change shifted, decreasing at a frequency of 13 mm/year and 15 mm/year. Both stations showed a continuous ascending trend, with the amplitude of annual maximum tide level change before the mutation year being greater than that after. These characteristics of change may be related to regional rainfall and the construction of water conservancy projects, which have enhanced the flood resilience of the main Huangpu River and effectively controlled the changes in tide levels

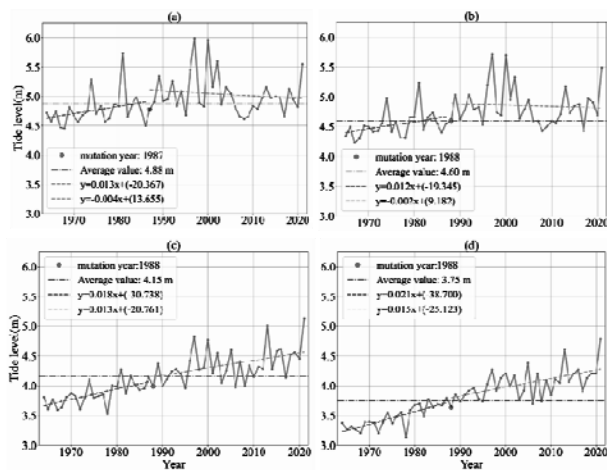


Fig. 1. Annual maximum tide level change process of (a) Wusong Station, (b) Huangpu Park Station, (c) Wujing Station and (d) Mishidu Station on the main stream of Huangpu River from 1964 to 2021.

In conclusion, the change of extreme water level at the four stations has shown a non-stationary increasing trend since 1964, and the mutation year of each station along the Huangpu River was around 1988. Two subseries were divided with the change-point as the dividing point for all these actual series in the stations. The tide level at the main stream of Huangpu River has been proven to be susceptible to tidal upwelling, and the upper reaches also showing a dependence on the upstream inflow. The phenomenon should be raised the attention of rainfall distribution studies in the Estuary region.

REFERENCES

- Bograd, SJ, Jacox, MG, Hazen, EL, Lovecchio, E, Montes, I, Pozo Buil, M, Shannon, LJ, Sydeman, WJ, and Rykaczewski, RR (2023). "Climate Change Impacts on Eastern Boundary Upwelling Systems," *Annual review of marine science*, 15, 303-328.
- Kai, Y, Sudong, X, Quan, Z, Nini, Z, and Mengqi, L (2021). "Effects of Sea Surface Warming and Sea-Level Rise on Tropical Cyclone and Inundation Modeling at Shanghai Coast," *Natural Hazards*, 109(1), 755-784.
- Milly, PCD, Betancourt, J, Falkenmark, M, Hirsch, RM, Kundzewicz, ZW, Lettenmaier, DP, and Stouffer, RJ (2008). "Stationarity Is Dead: Whither Water Management?," *Science*, 319(5863), 573-574.
- Wang, X, Yin, Ze, Wang, X, Tian, P, and Huang, Y (2018). "A Study on Flooding Scenario Simulation of Future Extreme Precipitation in Shanghai," *Frontiers of Earth Science*, 12(4), 834-845.
- Zervas, CE (2005). "Response of Extreme Storm Tide Levels to Long-Term Sea Level Change," *Oceans*.

ДОКЛАДЫ

С.Р. Чалов

Размывы берегов, их влияние на сток наносов и химический состав вод: результаты междисциплинарных исследований на реках бассейна Лены..... 4

Н.Н. Назаров, И.В. Фролова

Типы речных русел и эстетические свойства береговых природных комплексов..... 11

В.К. Калюжный

Трангрессивная эрозия русла реки Белой..... 18

Г.Л. Гладков, В.М. Католиков

Гидроморфологическое обоснование судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге..... 27

С.А. Двинских, О.В. Ларченко

Русловые деформации и изменения гидравлических условий в результате разработки ПГМ в нижнем бьефе Воткинского водохранилища (на примере Среднекамского и Верхне-Дулесовского участков)..... 43

Д.И. Исаев, Д.А. Орлов, С.И. Ванченко

Исследование процессов взаимодействия донных гряд с препятствием..... 49

Р.С. Чалов, А.С. Завадский, А.А. Куракова, А.М. Камышев

Морфология русла среднего и нижнего Иртыша (Российский участок).... 51

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Айбулатов Д.Н.	65	Завадский А.С.	51, 219
Барабанов А.Т.	180	Занозин В.В.	129
Баранов Д.В.	127	Занозин Вик.В.	129
Баркалов А.О.	196	Зарецкая Н.Е.	127, 142
Бармин А.Н.	129	Злотина Л.В.	73
Барышников С.Г.	66	Иванов М.А.	97, 120
Барышников Г.Я.	66	Иванов В.А.	117, 119
Бахарева Е.И.	69	Иванов М.М.	123
Белозёров Е.В.	148	Иванова Н.Н.	125
Беляков А.А.	71	Ильина А.А.	171
Беляков П.В.	99	Кадыров А.С.	87
Беркович К.М.	73	Казаков А.Г.	112
Бик Ю.И.	76	Калюжный В.К.	18, 131
Ботавин Д.В.	161	Ковалев С.Н.	135, 137
Буряк Ж.А.	78	Колос Г.И.	102
Бучельников М.А.	76	Копытов С.В.	139, 142
Бушуева О.Г.	81	Коркин С.Е.	144
Варенов А.Л.	83	Коркина Е.А.	144
Веденеева Е.А.	114	Коротаев В.Н.	145
Вершинин Д.А.	85	Косицкий А.Г.	148
Воробьев А.Ю.	87	Кофеева В.Н.	76
Воронина Ю.Е.	91	Краснов С.Ф.	81
Выпова А.В.	180	Крыленко И.В.	193
Гайфутдинова Т.В.	93	Кудрявцев Я.А.	186
Гарсеев А.М.	95	Кузякова Н.С.	120
Гафуров А.М.	97, 222	Кукулина Л.В.	150
Гладков Г.Л.	27, 99	Кулешова К.В.	114
Глейзер И.В.	112	Куракова А.А.	51, 151, 215
Голосов В.Н.	102, 206	Лаврова О.А.	222
Голубцов Г.Б.	106	Липатов И.В.	154
Горобец А.В.	81	Лисецкий Ф.Н.	156
Григорьев И.И.	108, 112, 184	Лобанов Г.В.	158
Губарева Е.К.	219	Лычагина Е.Л.	142
Гуменюк А.Е.	171	Медведева Р.А.	164
Гусаров А.В.	222	Михайлова Н.М.	73, 161
Давидович Ю.С.	218	Михневич Э.И.	166
Дедова И.С.	110	Нарожная А.Г.	169
Демаков Д.А.	142	Никонорова И.В.	171
Егоров И.Е.	112	Паниди Е.А.	196
Ермолаев О.П.	114, 164	Панин А.В.	127
Ефимов В.А.	119	Пермяков М.А.	184
Жидкин А.П.	102	Петелько А.И.	174, 177, 180
Жуков И.А.	65	Петров Н.Ф.	171
Жумабаева Г.У.	202	Петухова Л.Н.	186

Половинко В.В.	169	Lou. Sha	228
Прокопьева К.Н.	182	Nikitina. E.	228
Рахмонов К.Р.	204	Radnaeva. L.D.	228
Ржаковская П.С.	99	Wang. Jue	233, 237
Родионова М.Е.	169	Zhong. Guihui	233, 237
Рысин И.И.	108, 184, 186	Zhou. Zhengzheng	233
Рядно В.А.	120	Zhuang. Qi	233
Саляхова Р.Ю.	171		
Санников П.Ю.	139		
Сарнецкая М.И.	158		
Семаков В.А.	69		
Сидорчук А.Ю.	189		
Ситнов А.Н.	91		
Скиричников В.С.	191		
Соколов Ю.П.	99		
Сурков В.В.	193		
Тарбеева А.М.	193		
Трофимец Л.Н.	196		
Тузова Е.А.	198		
Турыкин Л.А.	73, 161		
Украинский П.А.	78		
Фингерт Е.А.	200		
Фомичева Д.В.	125		
Хикматов Ф.Х.	202, 204		
Цыпленков А.С.	150, 206		
Чалов Р.С.	51, 211, 215		
Чалов С.Р.	4, 117, 119, 182		
Червань А.Н.	218		
Чернов А.В.	142, 219		
Шакирянов М.Р.	93		
Шамшурина Е.Н.	102		
Шарифуллин А.Г.	222		
Шестова М.В.	91		
Школьный Д.И.	69, 224		
Шмакова М.В.	226		
Ялуков Т.В.	171		
Chen. Xiaolan	228		
Cieplowski. D.	119		
Fedorova. I.V.	228		
Habel. M.	119		
Jin. Yuting	233		
Koffi. B.	119		
Lin. Hejuan	237		
Liu. Shuguang	228, 233, 237		
Liu. Min	233, 237		
Liu. Zhihui	237		

*Оргкомитет выражает благодарность руководству
ООО «Проектно-строительное предприятие "Автомост"»
за оказание помощи в организации и проведении
XXXVIII пленарного совещания (конференции) ученых
и преподавателей вузов, объединяемых Межвузовским
научно-координационным Советом по проблемам эрозионных,
русловых и устьевых процессов при МГУ им. М.В. Ломоносова*



ПСП «Автомост» – это самый крупный проектно-изыскательский институт транспортной направленности в Пермском крае и один из крупнейших на Урале.

Основными направлениями деятельности компании являются: комплексные инженерные изыскания любой сложности, проектирование объектов нефтегазового комплекса, разработка проектов объектов транспортной инфраструктуры (автодороги и мостовые сооружения), землеустроительные и кадастровые работы.

За 30 лет работы ПСП «Автомост» было успешно выполнено более 1500 работ, связанных с разработкой проектов как в Пермском крае, так и по России в целом: инженерные изыскания на Амурском газохимическом комплексе; на рудниках Норильского никеля, УГМК, транспортные развязки и автодороги в Пермском крае (Восточный обход, съезд к новому терминалу аэропорта и многие другие).

Одним из основных приоритетных направлений компании является работа с молодыми специалистами, их непрерывное обучение и повышение профессионального уровня. Разработана программа поддержки и переквалификации специалистов, по которой компания оплачивает получение высшего образования.

Накопленный опыт, а также полная материально-техническая оснащенность компании позволяет с уверенностью смотреть в будущее и участвовать в самых амбициозных проектах по всей территории РФ.

Научное издание

**Тридцать восьмое пленарное
межвузовское координационное совещание по проблеме
эрозионных, русловых и устьевых процессов.
Доклады и сообщения**

Сборник научных трудов

*Ответственность за аутентичность и точность
цитат, имен, названий и иных сведений,
а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности
несут авторы публикуемых материалов.*

Издается в авторской редакции
Компьютерная верстка: *О. Н. Бастырева*

Подписано в печать 21.09.2023. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 14,18. Тираж 50 экз. Заказ 277180

Управление издательской деятельности
Пермского государственного
национального исследовательского университета.
614068 г. Пермь, ул. Букирева, 15

Отпечатано в типографии
Группа предприятий «АСТЕР»
614064, г. Пермь, ул. Усольская, 15, оф. 200.