

ДОБЫЧА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

А. А. Волчек¹, Н. Н. Шешко², Н. Н. Шпендик³, К. В. Балка⁴

¹ д.г.н., профессор кафедры природообустройства, д.г.н. БрГТУ, Республика Беларусь, г. Брест, volchak@tut.by

² к.т.н., доцент, начальник научно-исследовательской части БрГТУ, Республика Беларусь, г. Брест, optimum@tut.by

³ к.г.н., доцент кафедры ТГВ, БрГТУ, Республика Беларусь, г. Брест, shpendik@tut.by)

Аннотация

Добыча нерудных строительных материалов в руслах рек является значимым фактором антропогенного воздействия, требующим комплексной геоэкологической оценки для минимизации негативных последствий. Целью исследования является обоснование параметров безопасной добычи НСМ на участке реки Припять. Исследование основано на методах численного гидродинамического моделирования (COMSOL Multiphysics), анализе данных многолетних гидрометрических наблюдений (1978-2018 гг.) и сравнении цифровых моделей рельефа дна. Для анализа использовался модуль «Вычислительная гидродинамика» с применением RANS-модели турбулентности. Показано, что планируемая добыча НСМ не приведет к нарушению экологического состояния реки. Смоделированные скорости течения (>0.31 м/с) обеспечивают условия для жизнедеятельности гидробионтов. На основе анализа баланса наносов (годовой прирост $\sim 11\,034$ м³) установлен допустимый объем извлечения материала (33 122,5 м³) и оптимальная периодичность работ — один раз в три года.

ВВЕДЕНИЕ

Отсутствию научно обоснованной системы управления природопользованием в русловых экосистемах при добыче нерудных строительных материалов приводит к нарушению баланса между экономическими интересами и экологической устойчивостью речных систем Белорусского Полесья.

Добыча НСМ, особенно в условиях нарушенного гидростроительством твердого стока, является ключевым фактором деградации рек. Бесконтрольная разработка приводит к снижению меандрирования, обрушению берегов, изменению морфометрии русел, огрубению донных отложений, подмыву гидротехнических сооружений и сокращению твердого стока в дельтах.

Изъятие нерудных материалов приводит к значительным и структурным изменениям гидравлики потока и русловых процессов. К числу таких изменений относятся: снижение уровней воды в районе карьера и на вышележащем участке, интенсификация размыва русла в зоне перехода от плеса к перекату (кривой спада) и сопутствующее увеличение скоростей миграции русловых форм. Исследования проводились на основании работ, выполняемых Республиканским унитарным эксплуатационно-строительным предприятием «Днепро-Бугский водный путь» (РУЭСП «Днепробугводпуть») на участке 6 – 7 км р. Припять выше г. Пинска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ключевым фактором русловой динамики является гидродинамическое воздействие водного потока, обладающего кинетической энергией, способной производить эрозию, транспорт и аккумуляцию наносов. Возникающие деформации русла создают обратную связь, изменяя гидравлические параметры потока и его транспортирующую способность. Это создает механизм саморегуляции: размыв увеличивает живое сечение, что снижает скорость течения и транспортирующую способность, приводя к прекращению размыва. И наоборот, аккумуляция уменьшает сечение, увеличивая скорость и транспортирующую способность, что останавливает дальнейшее отложение наносов.

Вычисление расходов влекомых наносов равнинных рек с песчаным и песчано-гравелистым дном может применяться формула Шамова [1]:

$$Q_{\text{свл}} = 0,95 \sqrt{d_{\text{cp}}} \left(\frac{v_{\text{cp}}}{v_{\text{отл}}} \right)^3 \cdot (v_{\text{cp}} - v_{\text{отл}}) \cdot \left(\frac{d_{\text{cp}}}{H_{\text{cp}}} \right)^{1/4} \cdot B, \quad (1)$$

где $Q_{\text{свл}}$ – расход песчаных наносов, кг/с; $0,95 \sqrt{d_{\text{cp}}}$ – коэффициент, учитывающий состав донных наносов; d_{cp} – средневзвешенный диаметр подвижных фракций донных наносов в пробе, взятой на данной вертикали, м; $v_{\text{отл}}$ – средняя скорость, при которой прекращается движение наносов данной крупности, м/с; H – глубина на вертикали, м; B – ширина реки, м.

Основной объем твердого стока рек формируется в период половодий и паводков. Для большинства равнинных рек характерно опережающее нарастание расхода наносов по сравнению с расходом воды. Максимум транспорта наносов, как правило, наблюдается до пика паводка — приблизительно при расходе воды, составляющем $2/3$ от максимального значения ($2/3 Q_{\text{макс}}$). При этом последующие паводковые волны, даже при одинаковых расходах воды, обычно переносят меньше наносов по сравнению с основной волной половодья [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследуемого участка изыскания рельефа дна проводились в 2021 и 2022 годах в периоды весеннего половодья средствами гидроакустического многолучевого эхолота. База данных измерений представляет собой *.csv файл со значениями координат в плоской системе и отметок (глубин) дна для отдельных измеренных точек.

Обработка данных натурных измерений проводилась по средствам авторских конструктивных инструментов в среде ArcGis с применением ряда аппроксимационных моделей для анализа рельефа [3]. На основе сопоставительного анализа определены наиболее эффективные методы. В частности метод интерполирует гидрологически корректную растровую поверхность по точечным, линейным и полигональным данным. В результате обработки данных получены цифровые модели рельефа дна участка русла.

Моделирование гидродинамических характеристик потока в русле реки Припять было выполнено в среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. Для решения задачи использовался специализированный модуль «Вычислительная гидродинамика» (CFD). Расчеты проводились на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS).

На основании имеющихся данных о речном стоке и с применением математического моделирования определены среднемесячные и среднегодовые значения

твёрдого стока, включающего сток взвешенных и сток влекомых наносов, представленные в таблице 1.

Табл. 1. Твёрдый сток р. Припять – г. Пинск (мост Любанский) с учетом внутригодового распределения, м³/мес(год)

Месяцы												Год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Сток взвешенных наносов												
3288	2329	3970	6479	5093	3101	2415	1966	1805	1974	2243	2760	37423
Сток влекомых наносов												
546	490	1449	3165	1915	630	435	215	254	352	321	248	10020
Твердый сток												
3834	2819	5419	9644	7008	3731	2850	2181	2059	2326	2564	3008	47443

С целью анализа динамики русловых процессов на исследуемом участке выполнены расчеты изменений отметок дна русла (рис. 1). Результаты сравнительного моделирования показывают, что наиболее интенсивные русловые преобразования наблюдаются ниже мостового перехода и в районе излучины у левого берега.

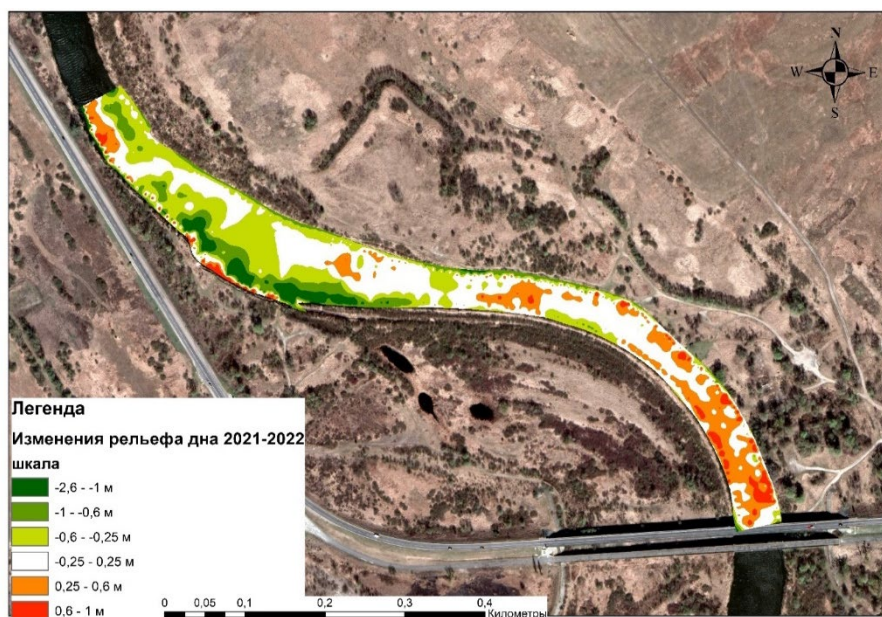


Рис. 1. Изменения рельефа дна за 1 год (с 2021 по 2022 гг.)

Полученные данные позволяют предположить активное участие указанных участков в руслоформирующих процессах, в связи с чем не рекомендуется их вовлечение в хозяйственную деятельность. Расчет баланса наносов показал положительное сальдо при сравнении данных 2021 и 2022 годов, что, вероятно, обусловлено смещением меандр в направлении автомобильной дороги с усовершенствованным покрытием.

Для анализа распределения скоростей течения в поперечных сечениях планируемых прорезей были построены эпюры скоростей по живому сечению реки. Исследование выполнено для существующих условий и для трансформированного русла.

Анализ деформации эпюры скоростей в продольном створе выявил следующие закономерности: гидродинамическая модель, учитывающая турбулентность и внешние силы (гравитация, центростремительное ускорение), включает три граничных условия – входной расход с типовой эпюрой локальных скоростей, выходной створ с нулевым избыточным давлением, а также непроницаемую границу с заданной шероховатостью и открытую границу с избыточным давлением.

Результаты моделирования демонстрируют, что в зоне прорезей скорость течения не превышает 0,31 м/с, что создает условия для интенсивной аккумуляции наносов. Одновременно на участках технологических перемычек зафиксированы скорости свыше 0,9 м/с, превышающие гидравлическую крупность донных отложений, что приведет к постепенной эрозии и изменению геометрии этих элементов.

На основе предварительного размещения прорезей в зонах наибольших донных наносов и зон с минимальной интенсивностью русловых процессов, вычислен ориентировочный объем возможных заборов НСМ, который составил 33122,5 м³.

ВЫВОДЫ

Проведенное комплексное исследование, включающее гидродинамическое моделирование, анализ многолетних гидрологических данных и мониторинг морфометрических изменений, позволяет сделать следующие выводы относительно добычи нерудных строительных материалов на участке реки Припять:

Запланированные добычные работы не приведут к нарушению экологического состояния речной системы. Смоделированные параметры течения (скорость > 0,31 м/с в зонах прорезей) обеспечивают сохранение условий для существования гидробионтов и поддержание качества воды. Установлена положительная динамика аккумуляции наносов с годовым объемом 11 034 м³, что подтверждается сравнением цифровых моделей рельефа за 2021-2022 годы. Определен допустимый объем извлечения материала - 33 122,5 м³ с рекомендуемой периодичностью работ 1 раз в 3 года, что соответствует принципу устойчивого использования ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волчек, А.А. Инженерная гидрология и регулирование стока. Гидрологические и водохозяйственные расчеты. Учебное пособие / А.А. Волчек, Ан.А. Волчек, В.К. Курсаков. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2013. – 315 с.
2. Михневич, Э.И. Левкевич, В.Е. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах// Мелиорация. – 2016. – №4(78) – С 18 – 23.
3. Волчек, А. А. Экологическое обоснование добычи нерудных строительных материалов из русел рек (на примере реки Припять) / А.А. Волчек и др. //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – №. 5. – С. 63-81.