

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ РЕКИ ЗАПАДНЫЙ БУГ

А. А. Волчек, д. г. н., профессор, профессор кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: Volchak@tut.by

М. Ф. Кухаревич, магистр, ассистент кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: kukharevichmikhail@gmail.com

С. И. Парфомук, к. т. н., доцент, зав. кафедрой математики и информатики, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru

С. В. Сидак, магистр, старший преподаватель кафедры математики и информатики, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Н. Н. Шешко, к. т. н., доцент, начальник научно-исследовательской части, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: optimum@tut.by

Н. Н. Шпендик, к. г. н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: shpendik@tut.by

Реферат

Река Западный Буг – трансграничная река в Восточной Европе. Средний многолетний расход воды в исследуемом створе составляет 80,2 м³/с, а весеннего половодья 1 % обеспеченности – 818 м³/с. Ретроспективный анализ данных аэрофотосъемки за период с 2004 по 2022 гг. позволил установить среднегодовую скорость перемещения береговой линии, которая составила 0,85 м/год.

Создана цифровая модель рельефа местности водосбора и построена детальная модель русла, которая основана на использовании уравнений малой воды и Навье-Стокса. Выделены участки подверженные риску размыва.

В русловой части крепление берегов рекомендуется в виде каменной наброски или каменного мощения. Для пойменной части вблизи двух меандр необходимо предусмотреть крепление в виде каменной наброски с устройством сопрягающего сооружения для пропуска паводковых вод.

Ключевые слова: река, сток, моделирование, размыв, меандрирование, крепление.

MODELING OF THE WESTERN BUG RIVER SHORES EROSION

**A. A. Volchek, M. F. Kukharevich, S. I. Parfomuk,
S. V. Sidak, N. N. Sheshko, N. N. Shpendik**

Abstract

The Western Bug River is a transboundary river in Eastern Europe. The average long-term water discharge in the studied section is 80.2 m³/s, and the spring flood

water discharge of 1% probability is 818 m³/s. Retrospective analyses of aerial photography data for the period from 2004 to 2022 allowed us to establish the average annual coastline movement rate, which was 0.85 m/year.

A digital relief model of the catchment area was created and a detailed channel model was constructed, which is based on the use of low-water and Navier-Stokes equations. Areas at risk of erosion are highlighted.

In the channel part the shore stabilization is recommended in the form of rock fill or stone paving. It is also necessary to provide for stabilization in the form of rock fill with a connecting structure for the passage of flood waters for the floodplain part near two meanders.

Keywords: river, runoff, modeling, erosion, meandering, fastening.

Введение

Река Западный Буг – трансграничная река в Восточной Европе, протекает на территории Украины, Беларуси и Польши. Берет начало на Подольской возвышенности течет через Украину, далее – по границе Беларуси и Польши и впадает в Загжинское водохранилище, а затем – в Вислу. Общая длина реки 772 км, на территории Беларуси – 154 км. В верхнем и нижнем течениях долина реки четко выражена и по ширине не превышает 2–3 км, пойма прерывистая, с многочисленными старицами. На среднем участке долина Западного Буга расширяется до 3–4 км и имеет широкую, низкую, заболоченную пойму. Русло реки на всем ее протяжении извилистое. Оно постепенно расширяется от 10–20 м в верхнем течении до 50–75 м – в нижнем, иногда до 200–300 м. Берега преимущественно пологие и заболоченные, на отдельных участках покрыты лесом [1, 2].

В настоящее время на р. Западный Буг, а также на притоках рр. Мухавец и Лесная действует гидрологический пост в д. Новоселки. Наблюдения ведутся с 1975 года. Для р. Западный Буг характерно смешанное питание с преобладанием грунтового, что вызвано малой мощностью снегового покрова и преобладанием легко проницаемых грунтов. Среднегодовой расход воды на границе Украины и Беларуси составляет 50 м³/с, при выходе за пределы Беларуси – 100 м³/с [3, 4].

Исследование гидроморфологических характеристик, связанных с изменением береговой линии р. Западный Буг, проводилось в рамках ГНТП «Природопользование и экологические риски», по заданию: «Выполнить оценку изменения гидроморфологических, гидрологических и гидрохимических показателей р. Западный Буг и разработать мероприятия по снижению их негативных последствий». В ходе выполнения задания установлено, что значительные изменения береговой линии происходят со стороны правого (белорусского) берега из-за характера течения реки с юга на север и направления вектора силы Кориолиса [5, 6].

Река Западный Буг относится к водным объектам с высоким риском наводнений вследствие весенних половодий и дождевых паводков, в результате которых могут происходить значительные затопления прибрежных территорий, включая пограничную инфраструктуру, сельскохозяйственные угодья и объекты, жилые и иные строения.

Основными факторами, которые приводят к смещению фарватера р. Западный Буг, выступают: абразия (размыв) берегов, прорыв меандров, многорукавность (образование отмелей и островов). Максимальное зафиксированное смещение составило 470 м. В результате проведенных ранее исследований установлено 36 участков р. Западный Буг со значительным (более 100 м) смещением фарватера реки за 35-летний период (1981–2016 гг.). Выявлено 198 участков многорукавности и 93 участка абразии правого берега. При этом величина абразии правого берега на 255 участках составила 3,665 км². Естественные гидроморфологические изменения р. Западный Буг привели как к абразии правого берега (смещения русла вправо), так и к аккумуляции правого берега (смещения русла влево). Величина аккумуляции правого берега на 252 участках составила 4,137 км². Несмотря на то, что общий баланс абразии и аккумуляции правого берега положительный для Беларуси на всем трансграничном участке протекания р. Западный Буг (+47,2 га), следует отметить интенсивную превалирующую абразию правого берега на «верхнем участке» р. Западный Буг от государственной границы «Беларус – Украина» до н. п. Домачево, а также ряд отдельных участков с интенсивной абразией правого берега (более 3 га) на «среднем участке» от н. п. Домачево до г. Бреста и «нижнем участке» от г. Брест до н. п. Крынки [7, 8].

Цель работы – в связи с происходящими процессами береговой эрозии на пограничных участках р. Западный Буг дать гидрологическое обоснование для проведения руслорегулирующих и берегоукрепительных мероприятий.

Исходные данные и методы исследования

Расчетные гидрологические характеристики

Период наблюдений за максимальными уровнями воды весеннего половодья по реке Западный Буг в створе Новоселки и по реке Лесная в створе Тюхиничи составляет 35 лет, с 1988 по 2022 гг. Для выявления особенностей колебаний максимальных уровней воды весеннего половодья рек Западный Буг и Лесная построены разностные интегральные кривые за 1988–2022 гг., которые показывают, что исследуемый период включает интервалы понижения и повышения максимальных уровней воды весеннего половодья, причем с начала XX века находится в положительной фазе – в тенденции повышения, и лишь в последние годы максимальные уровни воды начали снижаться.

Результаты расчетов по определению максимальных уровней воды весеннего половодья обеспеченностью 1, 3, 5 и 10 % по р. Западный Буг в створе Новоселки представлены в таблице 1, которые выполнены с помощью программного комплекса «Гидролог-2» [9, 10, 11, 12].

Таблица 1 – Максимальные уровни воды весеннего половодья обеспеченностью 1, 3, 5 и 10 % р. Западный Буг – Новоселки

Параметр	Уровень, см	Абсолютный уровень БС, м
Нв. п. P = 1 %	556	124,56
Нв. п. P = 3 %	504	124,04
Нв. п. P = 5 %	479	123,79
Нв. п. P = 10 %	442	123,42

Перенос уровней произведен на основании расчетных величин гидравлических уклонов, соответствующих многоводному периоду с учетом предположения близких гидравлических условий для р. Западный Буг и р. Лесная в многоводный период. Осредненные результаты по двум расчетным точкам представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Максимальные уровни воды весеннего половодья обеспеченностью 1, 3, 5 и 10 % р. Западный Буг – исследуемый створ

Параметр	Абсолютный уровень БС, м
Нв. п. P = 1 %	130,87
Нв. п. P = 3 %	130,52
Нв. п. P = 5 %	130,34
Нв. п. P = 10 %	130,08

Для переноса среднеговых уровней использовались данные натурный (разовых измерений) и данные наблюдений за уровнем воды на посту Новоселки принимая предположения, что на дату измерений уровни в исследуемом створе соответствовали многолетнему уровню (126,40). Расчетные уровни в исследуемом створе представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Максимальные уровни воды весеннего половодья обеспеченностью 1, 3, 5 и 10 % р. Западный Буг – исследуемый створ

Параметр	Абсолютный уровень БС, м
Нгод. P = 25 %	126,78
Нгод. P = 50 %	126,58
Нгод. P = 75 %	126,44

В связи с отсутствием данных гидрологических наблюдений за расходами воды по р. Западный Буг в исследуемом створе, нами использованы различные альтернативные методы определения основных гидрологических параметров получены следующие значения среднегодовых расходов воды (таблица 4).

Таблица 4 – Среднегодовые расходы воды реки Западный Буг в исследуемом створе

Параметр	Q, м ³ /с
Qгод. P = 5 %	154
Qгод. P = 10 %	133
Qгод. P = 25 %	106
Qгод. P = 50 %	80,2
Qгод. P = 75 %	58,6
Qгод. P = 90 %	45,9
Qгод. P = 95 %	35,6

Анализ трансформации русла р. Западный Буг

В современной науке широко используются геоинформационные системы. Для ретроспективного анализа пространственного смещения исследуемого

участка русла р. Западный Буг использованы данные дистанционного зондирования в виде снимком в видимом диапазоне с 2004 по 2022 годы. Для собранных растровых данных выполнена пространственная привязка в плоской системе координат Pulkovo_1942_CS63_Zone_C1. В виде линейных векторных объектов сформирована база данных пространственного положения уреза правого берега реки (рисунок 1) [13].



Рисунок 1 – Векторный объект «урез русла»



Рисунок 2 – Анализ смещений береговой линии участка русла реки (2004–2022 гг.)

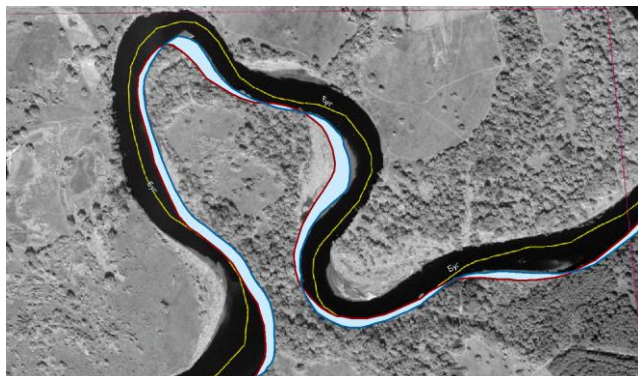


Рисунок 3 – Анализ смещений береговой линии участка русла реки (2004–2022 гг.)



Рисунок 4 – Анализ смещений береговой линии участка русла реки (2012–2022 гг.)

С использованием методики, разработанной авторами и детально описанной в работе [14, 15], выполнен анализ смещения положения русла и трансформации извилистости. Кроме того, в качестве основы для выполнения исследований была использована разработанная пространственная модель русла. Результаты обработки цифровой информации представлены на рисунках 2–4.

Таким образом, проведенный анализ позволил зафиксировать изменение береговой линии во времени на исследуемом участке, что свидетельствует о целесообразности проведения берегоукрепительных работ с целью предупреждения подмыва течением берега и, как следствие, формирование нового русла [16].

Для обработки данных дистанционного зондирования использован показатель скорости процесса перемещения береговой линии, который представляет собой отношение правых/левых площадей, образующихся пересечением векторного объекта береговой линии в начальный и конечный момент времени, к длине исследуемого участка реки и времени протекания данных процессов. Таким образом, получены следующие результаты, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет скорости трансформации береговой линии р. Западный Буг

Период времени, годы	Сумма правых площадей, м ²	Сумма левых площадей, м ²	Длина участка, м	Скорость трансформации в виде размыва, м/год	Скорость трансформации в виде отложений, м/год
2004–2012	17372,16	12611,67	2400	0,90	0,66
2012–2022	20951,33	7166,72	2485	0,84	0,29
2004–2022	36723,95	18178,84	2400	0,85	0,42

Как видно из данной таблицы скорость протекания данных процессов для отдельных интервалов времени незначительно отличается, в первую очередь это касается скорости формирования новой береговой линии за счет отложений. Однако, значительный интерес с точки зрения прогноза возникновения негативных последствий имеет процесс размыва, который для обоих интервалов времени сопоставим. В дальнейших исследованиях принята скорость пространственной деформации береговой линии равной 0,85 м/год.

Используя данные натурных измерений поперечного сечения русла выполнен прогноз изменений в вертикальной плоскости поперечного сечения. Принимая что при меандрировании русла реки осредненные параметры поперечного сечения русла остаются неизменными составили графическую модель деформации (рисунок 5).

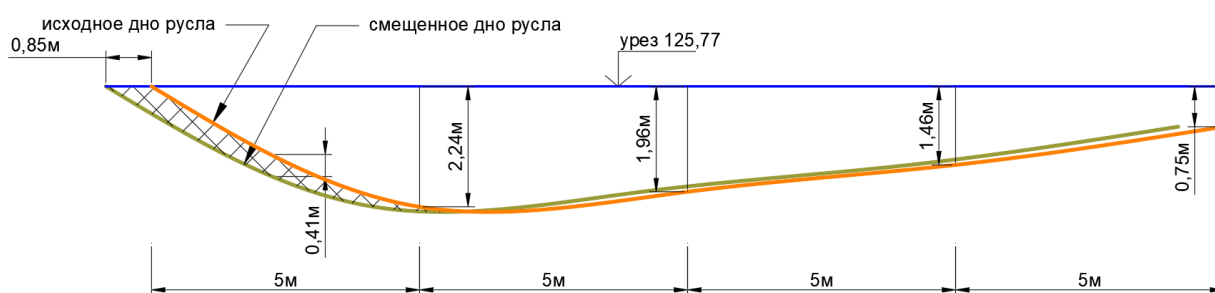


Рисунок 5 – Графическая модель деформации исследуемого участка русла р. Западный Буг

Как видно из рисунка 5, средняя глубина годового размыва составит 0,41 м.

Разработка цифровых моделей рельефа участка реки

ГИС обеспечение ArcGis и его набором инструментов ArcToolbox, а также инструменты среды гидравлического моделирования MIKE 3 [17, 18, 19].

В качестве картографических основ использованы следующие растровые слои различных масштабов:

- растровая топографическая карта;
- растровая карта вебсервиса Open street maps;
- растровые снимки дистанционного зондирования земли (maps.googleapis.com; Bing.map и др);
- данные геодезических изысканий, представленных заказчиком;
- данные эхолотных изысканий глубины реки в пределах исследуемого участка, представленных заказчиком.

В качестве исходной цифровой карты рельефа для вычисления водосборной площади реки в расчетном створе использовались данные портала usgs.gov.

В пределах исследуемого участка доступны 30 растровых данных о высотных отметках местности, с разрешением одна угловая минута [20].

Разрешение цифровой модели рельефа составило 30 м на 38 м. Используя алгоритмы приложения ArcGIS произведен расчет площади водосбора реки Западный Буг в исследуемом створе, которая составила 24865501221 м².

В качестве основы модели русла использована нерегулярная сетка с настраиваемым размером ячеек. Так, для русловой зоны в пределах данных эхолокационной съемки максимальный размер сетки составлял не более 50 кв. м, для прирусловой зоны – 70 кв. м, для пойменной части – 400 м². Для формирования общих границ области модели составлены дуги с заданными параметрами дуги.

Узлы модельной сетки проверялись на критерий равномерности (равнобедренности) и в случае низкого качества проводилась корректировка сетки. Методом интерполяции «Естественная окрестность» без экстраполяции. Таким образом получили модель участка русла и пойменной части.

Общее описание гидродинамической модели движения водных масс

Уравнения малой воды представляют собой систему гидродинамических уравнений, адаптированных для моделирования течений воды в условиях невысоких глубин. В контексте данной работы, уравнения малой воды играют ключевую роль, обеспечивая точное и эффективное моделирование движения водных масс в речных системах и прибрежных зонах.

Уравнения Навье – Стокса представляют собой полные уравнения гидродинамики, описывающие движение жидкости. В контексте гидродинамического моделирования для водных систем они записываются как [21, 22, 23]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \nu \nabla^2 u; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0, \quad (2)$$

где h – вектор скорости, u – вектор скорости, ρ – плотность жидкости, p – давление, g – ускорение свободного падения, ν – кинематическая вязкость.

Уравнения малой воды представляют собой упрощенный вариант уравнений Навье – Стокса, применяемый в случае невысоких глубин. Основное отличие заключается в том, что уравнения малой воды учитывают вертикальное распределение давления, что делает их более подходящими для моделирования течений в реках и прибрежных зонах.

В уравнениях малой воды:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = P - E - R; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + Tbx; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + Tby, \quad (5)$$

где h – глубина воды, u и v – компоненты скорости по горизонтали и вертикали соответственно, P – приход влаги, E – испарение, R – сток, g – ускорение свободного падения, Tbx и Tby – компоненты момента сил трения по горизонтали и вертикали.

Выбор уравнений малой воды обосновывается необходимостью учета особенностей гидродинамических процессов в речных системах и прибрежных зонах. Уравнения малой воды предоставляют адекватное описание движения воды при невысоких глубинах, что часто встречается в данных условиях [24, 25].

Сравнительный анализ уравнений позволяет выделить их применимость в различных сценариях моделирования, и уравнения малой воды становятся предпочтительным выбором для данной работы, обеспечивая баланс между точностью и вычислительной эффективностью в условиях ограниченных глубин.

Методология разработки

Первоочередным этапом разработки программы явилось определение целей и задач. Это включало в себя определение области применения программы, конечных пользователей и ожидаемых результатов. Целью явилось создание инструмента, способного моделировать движение водных масс в речных системах с высокой точностью.

После определения целей проводился анализ доступных технологий и инструментов для разработки программы.

Проектирование архитектуры программы включало в себя определение структуры данных, выбор методов численного анализа, и интеграцию с интерфейсом MIKE 3. Архитектура программы обеспечила эффективное выполнение численных расчетов и легкость внедрения в существующую среду MIKE 3 [17, 18].

На этапе реализации математической модели написаны алгоритмы, основанные на уравнениях малой воды. Используемые численные методы для решения дифференциальных уравнений, обеспечивают стабильность и точность расчетов.

Интеграция программы с MIKE 3 потребовала взаимодействия с API и техническими спецификациями MIKE 3. Это включало в себя корректную передачу данных между программой и платформой MIKE 3, а также обеспечение соответствия стандартам и требованиям MIKE 3.

Тестирование программы проводилось на различных тестовых сценариях, включая различные гидродинамические условия и географические особенности. Отладка включала в себя исправление выявленных ошибок и оптимизацию производительности.

После завершения разработки, программа подвергалась валидации и калибровке. Этот этап включал в себя сравнение результатов моделирования с реальными данными и регулировку параметров модели для достижения оптимального соответствия реальным условиям.

Весь процесс разработки документирован, включая описание архитектуры, методов решения, и технической документации по интеграции с MIKE 3. Это обеспечило понимание и поддержку программы.

Реализация программы

Для реализации программы выбран язык программирования, обеспечивающий эффективные вычисления и удобное взаимодействие с существующей средой MIKE 3. В результате выбора был сделан в пользу Python/C++, обеспечивающего гибкость и высокую производительность [20].

Для ускорения разработки и обеспечения стабильности программы использованы соответствующие библиотеки и фреймворки. Это включало в себя библиотеки для численных вычислений, обработки данных и взаимодействия с интерфейсом MIKE 3.

Программа разрабатывалась с учетом модульной архитектуры, позволяющей легкость в поддержке и дальнейшем расширении. Модули включали в себя основные вычислительные блоки, интерфейс взаимодействия с MIKE и компоненты для обработки входных и выходных данных.

Решение системы уравнений малой воды реализовано с использованием численных методов. Выбирались подходящие методы для численного интегрирования и решения дифференциальных уравнений, обеспечивая стабильность и точность расчетов.

Для успешной интеграции программы с MIKE осуществлялось во взаимодействие с API. Это включало передачу данных о гидродинамической модели между программой и MIKE, а также управление процессами моделирования через интерфейс MIKE.

Программа предоставляет средства визуализации результатов моделирования. Это включает графическое отображение траекторий движения водных масс, изменения глубины воды, и других параметров, позволяя пользователям наглядно оценить результаты.

Весь процесс разработки сопровождался документированием, включая техническую документацию по API MIKE 3, руководства пользователя и инструкции по установке. Это обеспечивает прозрачность в использовании программы и облегчает процесс внедрения.

После успешного завершения всех этапов тестирования и устранения неполадок, программа готова к завершающему этапу внедрения.

Параметры модели

Настройка параметров модели осуществлялась на основе калибровочных данных в виде максимального расхода весеннего половодья 50 % расчетной обеспеченности.

Настройка проводилась при отсутствии влияния планируемых к возведению оградительных дамб.

Настройка проводилась при следующих параметрах: среднегодовой сток р. Западный Буг в исследуемом створе 80,2 м³/с, отметка во входном сечении 126,58 м БС, гидравлический уклон 0,122 %. Используя данные параметры модели, производилась настройка естественной шероховатости русла реки.

В модели учитывалось влияние ускорения Кориолиса, а также неравномерность модельной сетки.

Полученные результаты и их анализ

Анализ результатов моделирования

Расчеты проводились с применением серверного вычислительного оборудования БрГТУ и позволили построить картину пространственного временных закономерностей уровней свободной поверхности потока, а также поля скоростей. Общее пространственно-временное разрешение модели 371000 ячеек с 100–200 временными интервалами при 10–20 слоях вертикальной сетки. Таким образом, максимальное количество расчетных ячеек 1484 млн и, соответственно, то же количество уравнений в системе. Настройка осуществлялась за счет корректировки параметров шероховатости русла, а также структуры и параметров расчетной сетки. Количество временных интервалов корректировалось с целью достижения установившегося режима, как видно на рисунке 6, как правило, стабилизация наблюдалась на 80–90 временном шаге.

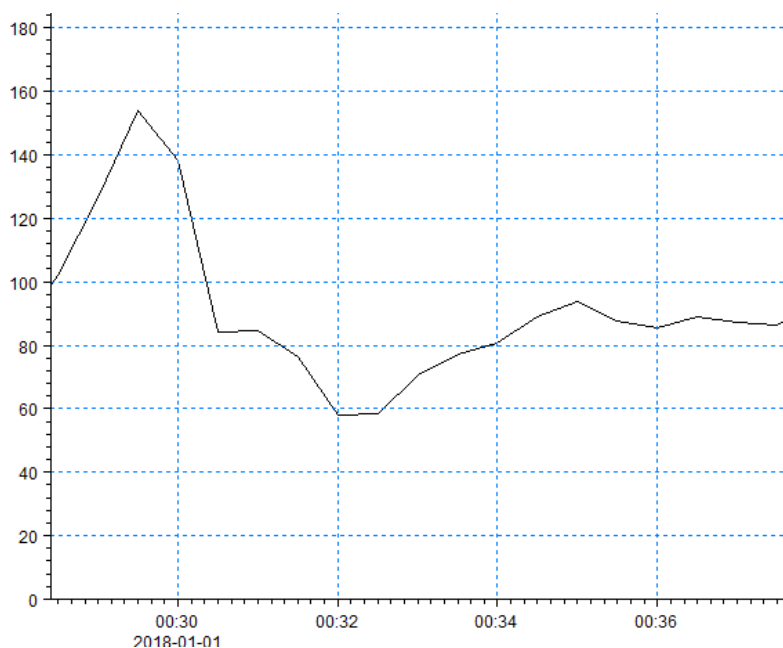


Рисунок 6 – Изменчивость расхода в расчетном створе во времени

Общие результаты моделирования для четырех расчетных расходов и уровней приведены на рисунках 7–9.

Анализируя полученные результаты, можно выделить участки подверженные риску размыва, а именно прибрежная/береговая зона по правому берегу в районе излучины как перед ней, так и после нее. Второй участок относится к пойменной зоне, затопление которой происходит в период весеннего половодья соответствующий максимальному сближению меандр русла. Расчетные скорости и участки, рекомендуемые к креплению, представлены на рисунке 10.

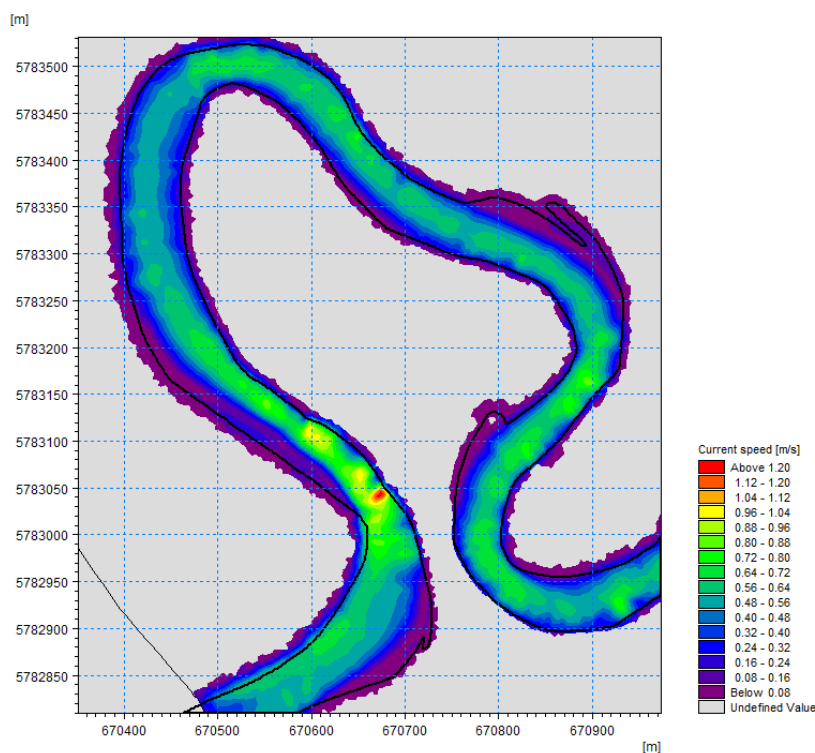


Рисунок 7 – Поле скоростей при среднегодовом расходе 25 % обеспеченности

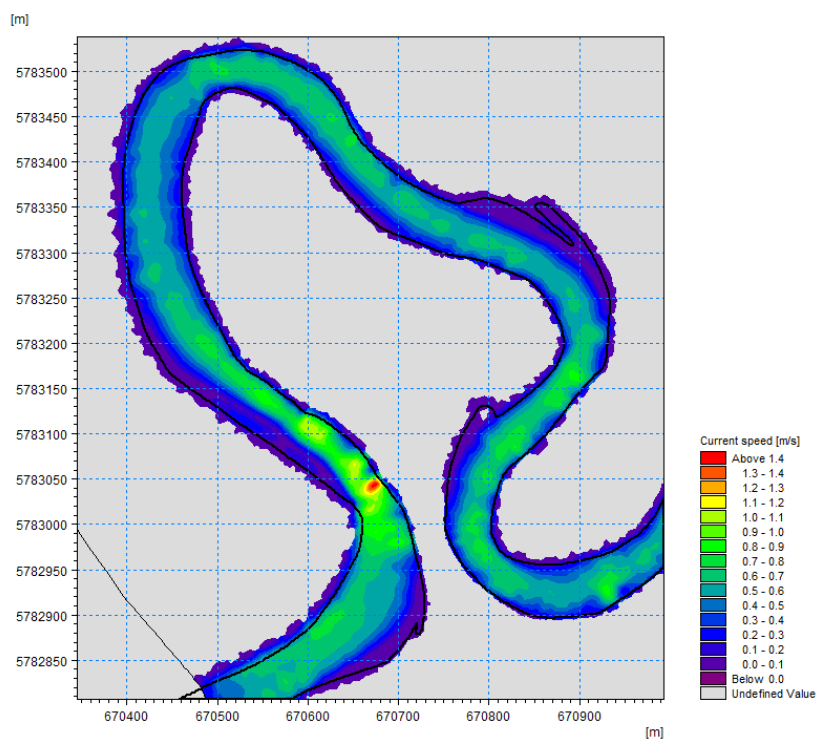


Рисунок 8 – Поле скоростей при среднегодовом расходе 50 % обеспеченности

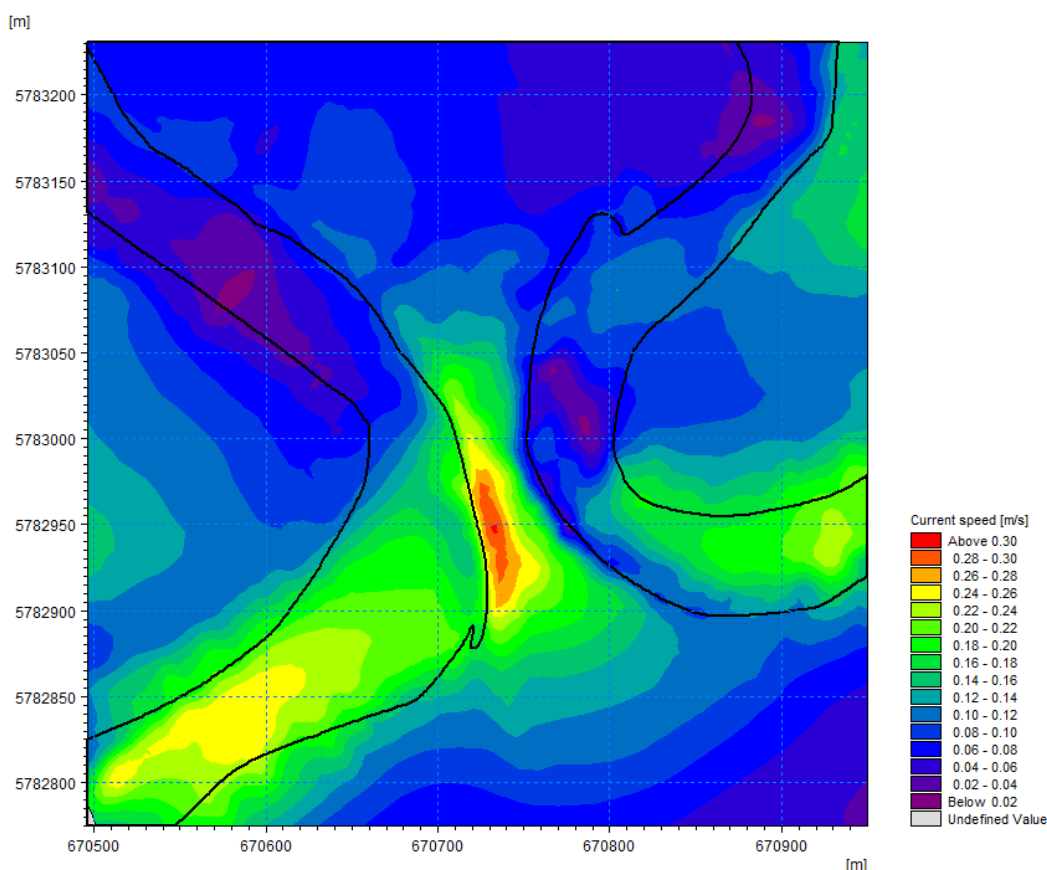


Рисунок 9 – Поле скоростей при расходе весеннего половодья 10 % обеспеченности

Так как полученные в результате моделирования скорости не превышают 2 м/с в русловой части, рекомендуемым методом крепления является каменная наброска или каменное мощение. Для пойменной части вблизи двух меандр также необходимо предусмотреть крепление в виде каменной наброски

с устройством сопрягающего сооружения для пропуска паводковых вод. Размеры сооружения и параметры крепления определить проектом исходя из фактических геологических условий, устойчивости к размыву и доступности применимых материалов.

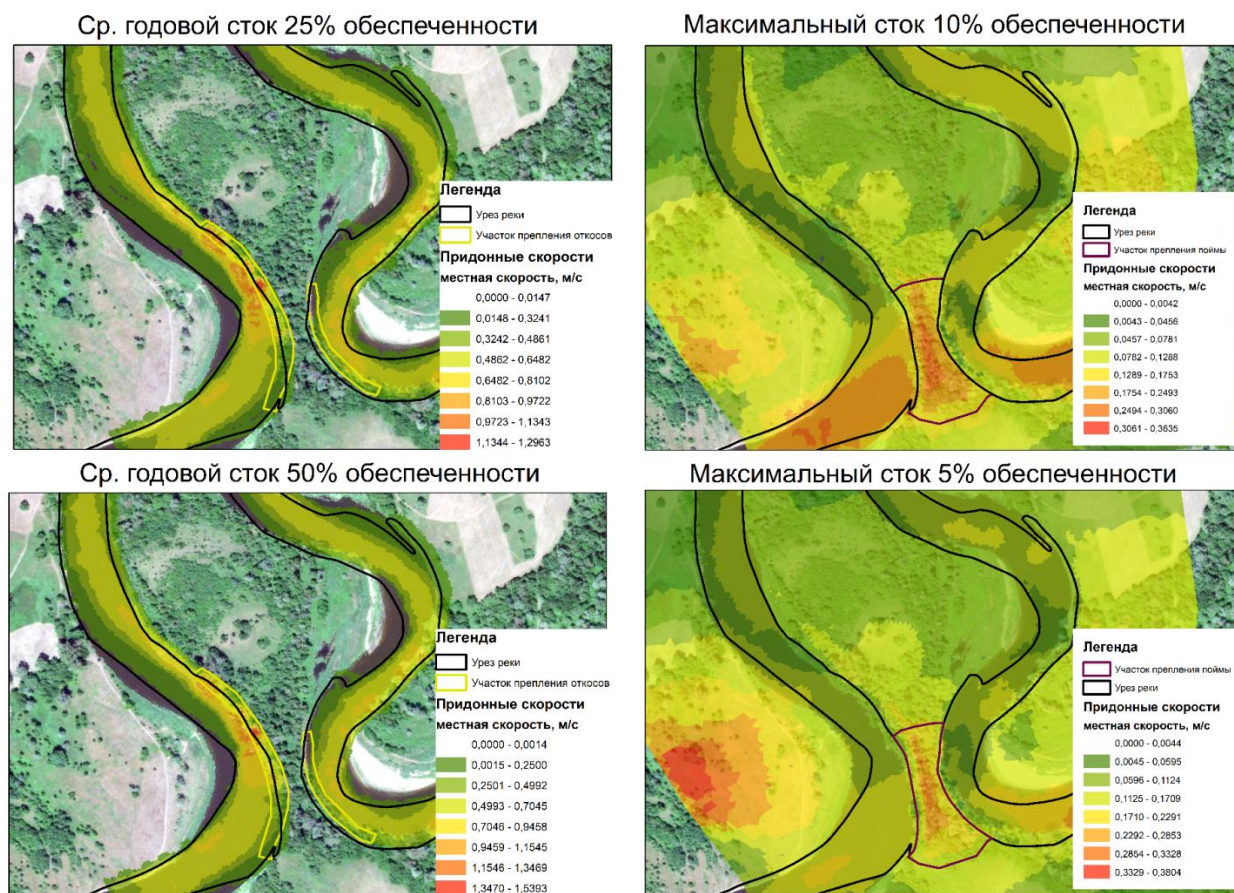


Рисунок 10 – Настройка гидродинамической модели

Береговые укрепления

Выбор типа укрепления берегов производится при соблюдении условий технической целесообразности и экономической выгоды. Рекомендуется использовать строительный материал, имеющийся на месте работ или в ближайшем районе. Техническая целесообразность заключается в том, чтобы прочность конструкции берегоукрепительных работ соответствовала тем силам, которым она должна противостоять. Известный своими работами во Франции инженер Фарг установил прямую зависимость между кривизной берега и глубиной реки у него, т. е. степенью его подмыва течением. Следует также учитывать, что нижняя часть откоса берега по высоте от подошвы до горизонта средне-низких меженных вод постоянно находится под водой и подвергается непрерывному подмывающему действию речного потока. Часть откоса от горизонта средне-низких меженных вод до горизонта самых высоких вод подвергается периодическому размывающему действию потока, разрушительному действию движущегося около берегов льда, влиянию атмосферных и грунтовых вод, зимой – действию мороза и, наконец, частично разрушается протаптыванием его животными и людьми. Выше горизонта самых высоких вод берег подвергается действию лишь атмосферных вод и мороза и протаптыванию животными и людьми. Особое внимание должно быть уделено защите нижней части

откоса от подошвы его до горизонта средне-низких меженных вод, так как разрушение этой части откоса вызывает обвал всей вышерасположенной его части. Часть берегового откоса от последнего горизонта до горизонта самых высоких вод прежде всего срезают и планируют под определенный уклон – от полуторного до тройного в зависимости от характера грунта, из которого состоит берег. Для грунтов более слабых принимают более пологий откос. По спланированному откосу устраивают тот или другой тип покрытия в зависимости главным образом, от величины весенних скоростей течения и мощности весеннего ледохода.

Различают береговые укрепления активного и пассивного действия. Первые заметно влияют на структуру потока в районе берега, а вторые – только защищают береговой откос от размыва.

Береговые покрытия могут быть сплошными, закрепляющими весь береговой откос от размыва, и ленточными, которые покрывают от размыва отдельные по длине части речного откоса.

Расчеты береговых покрытий включают в себя следующие разделы [26, 27]:

- оценка устойчивости покрытия на воздействие течения;
- определение длины и ширины покрытия;
- расчет крупности камня и толщины бетонных плит в надводной части сооружения;
- определение толщины пригрузки камнем в подводной части откоса.

Береговые откосы и укрепления на них, прежде всего, нужно проверять на устойчивость от воздействия скорости течения в районе укрепляемого берега. Для определения скоростей течения во вдольбереговой струе строятся натурные или расчетные планы течения на участке реки при среднемеженном и среднепаводковом расходах воды. Если пойма реки на участке затапливается в половодье, то за расчетный высокий уровень воды принимается уровень пойменных (меженных) бровок. По данным о гранулометрическом составе грунта, слагающего береговой откос, и по нормативным материалам устанавливаются допустимые (неразмывающие) скорости течения при расчетных уровнях воды. В зависимости от состава грунтов, слагающих откос, в соответствии с нормативными требованиями устанавливается также допустимое заложение берегового откоса при его укреплении.

Сравнение фактических скоростей течения с допустимыми позволяет оценить устойчивость берегового откоса при воздействии на него течения воды, и, при необходимости, выбрать соответствующее береговое укрепление. Длина зоны крепления берегового откоса устанавливается на основе сопоставленных и совмещенных планов участка за многолетний период и планов течения при характерных уровнях воды.

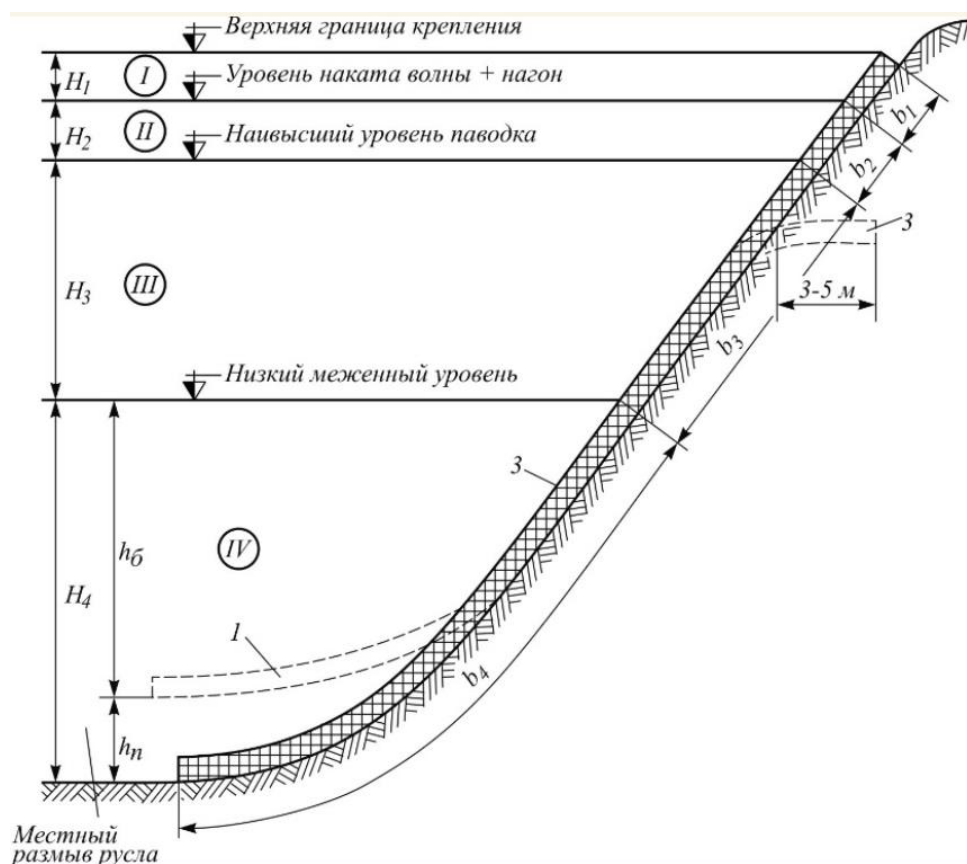
Для определения ширины укрепления береговой откос разбивается на четыре зоны: I – зону надводного откоса; II – зону наката волн и ветровых нагонов; III – зону переменных уровней; IV – зону подводного откоса (ниже низких меженных уровней воды). Расчетная схема разбивки берегового откоса на зоны показана на рисунке 11.

Ширина укрепления в каждой зоне и размер крупности камня для крепления надводного откоса определяется расчетом. Нижняя граница защищаемого

участка, как правило, располагается в зоне пересечения плоскости откосов и склонов с их подошвой. В случае, если максимальные донные скорости превышают допустимые значения неразмывающих донных скоростей, в конструкции берегозащитного сооружения необходимо предусматривать противоразмывной фартук в виде гибкого матраса, каменной наброски и т. п. Глубину размыва следует устанавливать по данным натурных наблюдений или определять на основании расчета.

Для подбора наиболее эффективного типа берегозащитного сооружения для конкретного участка и правильного назначения его параметров необходимо выполнять подробные гидрологические исследования режима реки, результаты которых должны содержать следующие данные:

- длину и источники питания реки, площадь ее водосборного бассейна;
- ширину и глубину руслового потока, его уклон;
- характер берегов и тип руслового процесса на исследуемом участке реки, оценку характера глубинных и плановых деформаций русла и поймы;
- скорости течения, расход и отметки уровня реки в межень и в паводки, их повторяемость и обеспеченность;
- характеристику паводков, их интенсивность и продолжительность, границы затопления местности;
- данные о высоте, длине, периоде и обеспеченности ветровых волн;
- продолжительность ледоходов, а также данные о толщине и плотности ледяного покрова.



1 – первоначальное положение подводной части покрытия; 2 – береговое покрытие;
3 – укрепление горизонтального участка низкого (затопляемого) берега
Рисунок 11 – Схема к расчету берегового укрепления (покрытия)

Сопоставление и выбор оптимальных конструкций должны сопровождаться соответствующими технико-экономическими обоснованиями, при разработке которых следует учитывать степень целесообразности и эффективности проектно-строительных решений различных вариантов. Технические и технологические решения конкретного варианта должны содержать оценки экономического, социального и экологического эффектов при его осуществлении.

Заключение

Ретроспективный анализ данных аэрофотосъемки за период с 2004 по 2022 гг. на основе динамики пространственной деформации русла реки позволил установить среднегодовую скорость перемещения береговой линии, которая составила 0,85 м/год. При условии сохранения общего поперечного сечения русла и установленной прогнозной скорости смещения определена величина размыва русла в вертикальной плоскости (0,41 м/год).

По результатам натурных исследований и дистанционного зондирования создана цифровая модель рельефа местности водосбора р. Западный Буг в исследуемом створе, а по данным геодезических изысканий и эхолотной съемки построена детальная модель русла исследуемого участка. Средне многолетний расход воды в исследуемом створе р. Западный Буг составил 80,2 м³/с, а весеннего половодья 1 % обеспеченности – 818 м³/с. Определение расчетных уровней осуществлялось на основе естественного гидравлического уклона.

Разработанная гидравлическая модель исследуемого участка русла основана на использовании двух зависимостей: уравнение малой воды и уравнение Навье – Стокса. Выбор метода осуществлялся на основе данных о сходимости при вычислении матрицы коэффициентов системы уравнений. Модель включала от 10 до 20 слоев расчетной сетки по вертикали. Выделены участки подверженные риску размыва, а именно прибрежная/береговая зона по правому берегу в районе излучины, как перед ней, так и после нее. Второй участок относится к пойменной зоне, соответствующей максимальному сближению меандр русла, затопление которой происходит в период весеннего половодья.

В русловой части крепление берегов рекомендуется в виде каменной наброски или каменного мощения, так как скорости течения не превышают 2 м/с. Для пойменной части вблизи двух меандр необходимо предусмотреть крепление в виде каменной наброски с устройством сопрягающего сооружения для пропуска паводковых вод.

Список цитированных источников

1. Волчек, А. А. Водные ресурсы Брестской области / А. А. Волчек, М. Ю. Калинин. – Минск : Изд. центр БГУ, 2002. – 436 с.
2. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск : Тонпик, 2006. – 160 с.
3. Проект Плана управления бассейном р. Западный Буг. – Минск, 2016. – 54 с.
4. Корнеев, В. Н. Оценка изменения гидроморфологических, гидрологических и гидрохимических показателей реки Западный Буг и мероприятия по снижению их негативных последствий / В. Н. Корнеев [и др.] // Вестник Брестского гос. технич. ун-та. – 2021. – № 1 (124). – С. 90–95.
5. Пеньковская, А. М. Влияние гидроморфологических изменений в речной сети на экологический статус водных объектов бассейна реки Западный Буг / А. М. Пеньковская, Е. Н. Попова, И. А. Булак // Вестник Брестского гос. технич. ун-та. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2016. – № 2. – С. 24–29.

6. Пеньковская, А. М. Экологическое состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственные проблемы и мероприятия, направленные на их решение в бассейне реки Западный Буг / А. М. Пеньковская, Е. Н. Попова. – Минск : ЦНИИКИВР, 2015. – С. 226–228.
7. Михневич, Э. И. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич // Мелиорация. – 2016. – № 4 (78). – С. 18–23.
8. Волчек, Ан. А. Затопления на территории Беларуси / Ан. А. Волчек // Вестник Брестского гос. технич. ун-та. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 39–53.
9. Волчек, А. А. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока // А. А. Волчек, С. И. Парфомук / Веснік Палескага дзярж. ун-та. Серыя прыродазнаўчых навук. – 2009. – № 1. – С. 22–30.
10. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учеб.-метод. пособие / А. А. Волчек, П. С. Лопух, Ан. А. Волчек. – Минск : БГУ, 2019. – 316 с.
11. Желязняков, Г. В. Точность гидрологических измерений и расчетов / Г. В. Желязняков, Б. Б. Данилевич. – Л. : Гидрометеорологическое изд-во, 1966. – 240 с.
12. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения : ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Введ. 01.07.2010. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.
13. Волчек, А. А. Геоинформационная система гидрографической сети водосбора р. Западный Буг / А. А. Волчек, В. Соболевски, Н. Н. Шешко // Вестник Брестского гос. технич. ун-та. Серия: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2009. – № 2. – С. 2–8.
14. Волчек, А. А. Трансформация гидрографической сети малых рек водосбора р. Припять в пределах природно-территориального комплекса национального парка «Припятский» / А. А. Волчек, О. П. Мешик, Н. Н. Шешко // Прыроднае асяроддзе Палесся : зб. навук. прац / Палескі аграрна-экалагічны інстытут НАН Беларусі ; рэдкал. : М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Брэст : Альтернатива, 2014. – Вып. 7. – С. 11 – 14.
15. Волчек, А. А. Учет разовых гидрометрических измерений при определении основных гидрологических характеристик и параметров русла / А. А. Волчек, Н. Н. Шешко // Сахаровские чтения 2011 года: экологические проблемы XXI века : материалы 11-й междунар. науч. конф., 19–20 мая 2011 г., г. Минск / под ред. С. П. Кундаса, С. С. Позняка. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. – С. 237–238.
16. Макаревич, А. А. Речной сток и русловые процессы : пособие / А. А. Макаревич, А. Е. Яротов. – Минск : БГУ, 2019. – 115 с.
17. DHI. MIKE 3 Flow Model FM – Hydrodynamic Module Scientific Documentation. – URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products> (date of access: 30.07.2024).
18. DHI. MIKE 3 Sediment Transport Module ST – Scientific Documentation. – URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com> (date of access: 01.07.2024).
19. Курушин, А. А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL / А. А. Курушин. – М. : One-Book. – 2016. – 376 с.
20. Косицин, Д. Ю. Язык программирования Python: учеб.-метод. пособие / Д. Ю. Косицин. – Минск: БГУ, 2019. – 136 с.
21. Александров, Д. В. Введение в гидродинамику: учеб. пособие / Д. В. Александров, А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Исакова. – Екатеринбург : Изд-во Урал, ун-та, 2012. – 112 с.
22. Анкудинов, В. Е. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах : учеб. пособие / В. Е. Анкудинов, Д. Д. Афлятунова, М. Д. Кривилев, Г. А. Гордеев. – Ижевск : Изд-во Удмуртского ун-та, 2014. – 108 с.
23. Колесниченко, В. И. Введение в механику несжимаемой жидкости : учеб. пособие / В. И. Колесниченко, А. Н. Шарифулин. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 127 с.
24. Калугин, А. С. Математическое моделирование движения паводочной волны при использовании исходной информации различной детальности / А. С. Калугин, И. Н. Крыленко // Водное хозяйство России. – 2014. – № 3. – С. 138–145.
25. Мележ, Т. А. Инженерно-геологическая оценка экзодинамических режимов долины реки Припять и прилегающих территорий / Т. А. Мележ, А. И. Павловский // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2015. – № 3 – С. 122–124.

26. Михневич, Э. И. Пропускная способность русел регулируемых рек и водоотводящих каналов / Э. И. Михневич // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития : сб. науч. трудов : вып. 1 : в 2 т. / Водные ресурсы Полесья. – Брест : Альтернатива, 2008. Т. 2. – С. 38–41.

References

1. Volchek, A. A. Vodnye resursy Brestskoj oblasti / A. A. Volchek, M. Ju. Kalinin. – Minsk: Izdatel'skij centr BGU, 2002. – 436 s.
2. Loginov, V.F. Vodnyj balans rechnyh vodosborov Belarusi / V.F. Loginov, A.A. Volchek. – Minsk: Tonpik, 2006. – 160 s.
3. Proekt Plana upravlenija bassejnom r. Zapadnyj Bug. – Minsk, 2016. – 54 s.
4. Ocenka izmenenija gidromorfologicheskikh, gidrologicheskikh i gidrohimičeskikh pokazatelej reki Zapadnyj Bug i meroprijatija po snizheniju ih negativnyh posledstvij / V. N. Korneev [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2021. – № 1 (124). – S. 90–95.
5. Pen'kovskaja, A. M. Vlijanie gidromorfologicheskikh izmenenij v rechnoj seti na jeko-logičeskij status vodnyh ob#ektov bassejna reki Zapadnyj Bug [Jelektronnyj resurs] / A. M. Pen'kovskaja, E. N. Popova, I. A. Bulak // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Vodohozjajstvennoe stroitel'stvo, teplojenergetika i geojekologija. – 2016. – № 2. – S. 24–29.
6. Pen'kovskaja, A. M. Jekologičeskoe sostojanie poverhnostnyh vodnyh ob#ektov, vodohozjajstvennyje problemy i meroprijatija, napravlennye na ih reshenie v bassejne reki Zapadnyj Bug / A. M. Pen'kovskaja, E. N. Popova. – Minsk: CNIKIIVR, 2015. – S. 226–228.
7. Mihnevich, Je.I. Levkevich, V.E. Ustojčivost' beregov vodohranilishh pri formirovani-i profilja dinamicheskogo ravnovesija v nesvjaznyh gruntah// Melioracija. – 2016. – №4(78) – S 18 – 23.
8. Volchek, An. A. Zatoplenija na territorii Belarusi [Jelektronnyj resurs] / An. A. Volchek // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Vodohozjajstvennoe stroitel'stvo, teplojenergetika i geojekologija. – 2017. – № 2. – S. 39–53.
9. Volchek, A.A. Paket prikladnyh programm dlja opredelenija raschetnyh harakteristik rechnogo stoka // A.A. Volchek, S.I. Parfomuk / Vesnik Paleskaga dzhzjarzhaýnaga universitjeta. Seryja pryrodaznaýchyh navuk. – 2009. – №1. – S. 22–30.
10. Volchek, A.A. Hidrologičeskie rasčety : ucheb.-metod. posobie // A.A. Volchek, P.S. Lopuh, An.A. Volchek. – Minsk : BGU, 2019. – 316 s.
11. Zheljaznjakov G.V. Točnost' gidrologičeskikh izmerenij i raschetov / G.V. Zheljaznjakov, B.B. Danilevich. – L.: Gidrometeorologičeskoe izd-vo, 1966. – 240 s.
12. Raschetnye gidrologičeskie harakteristiki. Porjadok opredelenija. Tehničeskij kodeks ustanovivshejsja praktiki TKP 45-3.04-168-2009(02250). – Minsk: RUP «Stroj-tehnorm», 2010. – 55 s.
13. Volchek, A. A. Geoinformacionnaja sistema gidrografičeskaj seti vodosbora r. Zapadnyj Bug / A. A. Volchek, V. Sobolevski, N. N. Sheshko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Vodohozjajstvennoe stroitel'stvo i teplojenergetika. – 2009. – № 2. – S. 2–8.
14. Volchek, A.A. Transformacija gidrografičeskaj seti malyh rek vodosbora r. Pripjat' v predelah prirodno-territorial'nogo kompleksa nacional'nogo parka «Pripjatskij» / A.A. Volchek, O.P. Meshik, N.N. Sheshko // Pryrodnae asjaroddze Palessja: zb. navuk. prac / Paleski agrarnajekalagichny instytut NAN Belarusi; rjedkal. M.V. Mihal'chuk (gal. rjed.) [i insh.]. - Brjest; Al'ternativa, 2014. - Vyp. 7. – S. 11 – 14.
15. Volchek, A.A. Uchet razovyh gidrometričeskikh izmerenij pri opredelenii osnovnyh gidrologičeskikh harakteristik i parametrov rusla/ A.A. Volchek, N.N. Sheshko // Sa-harovskie čhtenija 2011 goda: jekologičeskie problemy XXI veka : materialy 11-j mezh-dunar. nauch. konf., 19–20 maja 2011 g., g. Minsk, Respublika Belarus' / pod red. S. P. Kundasa, S. S. Poznjaka. – Minsk : MGJeU im. A. D. Saharova, 2011. – S. 237–238.
16. Makarevich, A. A. Rechnoj stok i ruslovyje processy : posobie / A. A. Makarevich, A. E. Jarotov. – Minsk : BGU, 2019 – 115 s.
17. DHI. MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module Scientific Documentation [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products>. – Data dostupa: 30.07.2024.

18. DHI. MIKE 3 Sediment Transport Module ST - Scientific Documentation [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.mikepoweredbydhi.com>. – Data dostupa: 01.07.2024.
19. Kurushin A.A. Reshenie mul'tifizicheskikh SVCh zadach s pomoshh'ju SAPR COMSOL – M., «One-Book», 2016. – 376 s.
20. Kosicin, D. Ju. Jazyk programmirovaniya Python: ucheb.-metod. posobie / D. Ju. Kosicin. – Minsk: BGU, 2019. – 136 s.
21. Aleksandrov, D. V. Vvedenie v gidrodinamiku: ucheb. posobie /D. V. Aleksandrov, A. Ju. Zubarev, L. Ju. Iskakova. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural, un-ta, 2012. – 112 s.
22. Ankudinov V. E., Afljatunova D. D., Krivilev M. D., Gordeev G. A. Komp'yuternoe modelirovanie processov perenosa i deformatsij v sploshnyh sredah: Uchebnoe po-sobie. 1-eizdanie. – Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskij universitet», 2014. – 108 s.
23. Kolesnichenko, V.I. Vvedenie v mehaniku neszhimaemoj zhidkosti: ucheb. posobie / V.I. Kolesnichenko, A.N. Sharifulin. – Perm' : Izd-vo Perm. nac. issled. politehn. un-ta, 2019. – 127 s.
24. Kalugin, A. S. Krylenko, I. N. Matematicheskoe modelirovanie dvizhenija pavodochnoj volny pri ispol'zovanii ishodnoj informacii razlichnoj detal'nosti / A. S. Kalu-gin, I. N. Krylenko // Vodnoe hozjajstvo Rossii. – 2014. – №3. – S.138-145.
25. Melezh, T.A. Inzhenerno–geologicheskaja ocenka jekezodinamicheskikh rezhimov doliny reki Pripjat' i prilegajushhih territorij / T. A. Melezh, A. I. Pavlovskij //VESTNIK VGU. SERIJa: GEOLOGIJa. 2015 № 3 – S.122 – 124.
26. Mihnevich, Je.I. Propusknaja sposobnost' rusel reguliruemyh rek i vodootvodjashhih kanalov / Je.I. Mihnevich // Prirodnaja sreda Poles'ja: osobennosti i perspektivy razvitija: sb. nauch. tr. Vyp. 1: v 2 t. – T. 2. Vodnye resursy Poles'ja.– Brest : Al'terna-tiva, 2008. – S. 38–41.

УДК 91:504

ОЦЕНКА СЕНСОРНОСТИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ВОДОСБОРОВ БАССЕЙНА Р. ЯСЕЛЬДЫ

*А. А. Волчек, д. г. н., профессор, профессор кафедры природообустройства,
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
e-mail: Volchak@tut.by*

*И. В. Окоронко, ст. преподаватель кафедры биологических и химических
технологий, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина,
Брест, Беларусь, e-mail: okoronko2007@ya.ru*

Реферат

В статье рассмотрены современные подходы к экологическому нормированию качества почв бассейна р. Ясельды посредством анализа почв по степени гидроморфизма. При нарастании степени гидроморфизма возрастает восстановительный потенциал почв, способствующих накоплению как общего, так и легкогидролизуемого азота. Гидроморфизм почв влияет на подвижность фосфатов в почвах. Согласно используемой методике, были рассчитаны показатели сенсорности почвенного покрова для выделенных элементарных водосборов речного бассейна по отношению к загрязнению азотом и фосфором.

Ключевые слова: сенсорность почвенного покрова, гидрографическая сеть, речные бассейны, факторы антропогенной нагрузки, сенсорность почв, загрязнение азотом и фосфором.