

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕЖИМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЗАБОРОВ

*В. Е. Левкевич<sup>1</sup>, И. И. Кирвель<sup>2</sup>, Н. В. Юшкевич<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Профессор, БНТУ, Минск, Республика Беларусь, [v.lev2014@mail.ru](mailto:v.lev2014@mail.ru)

<sup>2</sup> Профессор, Поморский университет, г. Слупск, Польша, [kirvel@yandex.ru](mailto:kirvel@yandex.ru)

<sup>3</sup> Аспирант, БНТУ, Минск, Республика Беларусь, [archibald52@mail.ru](mailto:archibald52@mail.ru)

### **Аннотация**

В статье излагаются некоторые результаты натурных исследований режима заиления водохранилищ, а также приводится оценка влияния заиления на работу поверхностных водозаборов. На основе анализа опубликованных материалов и собственной базы данных, полученных на основе натурных исследований и обследования водоемов, авторами предлагается структура многофакторной модели осадконакопления. На основе данных натурного обследования одного из типичных русловых водохранилищ Беларуси приведена оценка масштабов осадконакопления и его влияния на работу водозабора.

**Ключевые слова:** водохранилище, заиление, наносы, водозабор.

## INFLUENCE OF THE PROCESS OF SILTING OF RESERVOIRS ON THE OPERATION MODE OF SURFACE WATER INTAKE

*V.E. Levkevich, I.I. Kirvel, N. V. Yushkevich*

### **Abstract**

The article presents some results of field studies of the siltation regime of reservoirs and also provides an assessment of the effect of siltation on the operation of surface water intakes. Based on the analysis of published materials and their own database obtained on the basis of field studies and surveys of water bodies, the authors propose the structure of a multi-factor sedimentation model. On the basis of data from a field survey of one of the typical run-of-river reservoirs in Belarus, an assessment of the scale of sedimentation and its impact on the work of water intake is given.

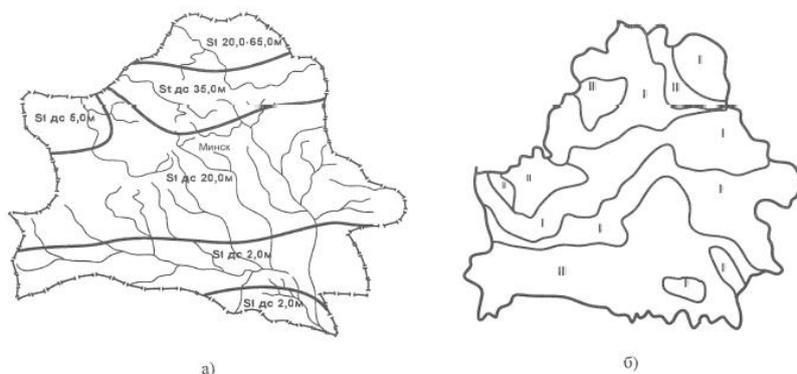
**Keywords:** reservoir, silting, sedimentation, water intake.

**Введение.** В Республике Беларусь эксплуатируется значительное количество искусственных водоемов, на которых расположены поверхностные водозаборы различных конструкций. Срок эксплуатации водозаборов, равно как и водохранилищ в большинстве случаев, составляет более 20–30 лет. В период эксплуатации водозаборов возникают условия, ухудшающие режим функционирования насосного оборудования. Основой этой проблемы является процесс заиления водохранилища, уменьшения его полезного объема и глубин у водо-

приемных устройств. Причиной заиления является поступление биогенов с территории водосбора и с естественным стоком водотока, на котором образовано водохранилище, а также смыв почв с прилегающих территорий, накоплением остатков высшей водной растительности, растущей в водоеме, а также поступление и накопление материала волновой переработки берегов в виде наносов, которые в общем объеме илов могут составлять от 25 до 45 %. Основной целью проведенных исследований явилась оценка режима заиления и, в частности, масштаба накопления наносов, образующихся при переработке берегового склона на эксплуатацию водохранилищных водозаборов.

**Материалы и методы.** Основным методом исследований явился анализ натуральных данных, полученных в результате обследования ряда водных объектов. Приводится количественная оценка заиления водохранилищ. Предложены структуры многофакторных моделей заиления водоемов наносным материалом, которые при дальнейшем наполнении базы данных фактическими сведениями позволят получить прогноз заиления

**Результаты и обсуждение.** Как известно, русловой процесс рельефообразования представляет собой единство двух взаимно противоположных явлений: эрозия и осадения (аккумуляция) наносов [1–7]. В результате проявления этих процессов, вся территория страны по проявлению эрозии и абразии зонирована с выделением ряда зон (рисунок 1) [2, 8, 9].



а) – процесс абразии ( $S_t$  – линейная переработка береговой линии, м/год); б) – процесс эрозии ( I – сильного проявления; II – слабого и среднего проявления; III – отсутствие или очагового проявления)

**Рисунок 1** – Зонирование Беларуси по развитию процессов абразии и эрозии

С момента создания водохранилища начинается преобразование форм рельефа, в пределах которых размещается или с которыми контактирует водохранилище, так как эти формы не соответствуют новым гидрологическим и гидрогеологическим условиям. Наиболее интенсивные изменения рельефа происходят вблизи береговой черты водохранилища, затрагивая как побережье, так и прибрежную акваторию (рисунок 2).



**Рисунок 2** - Переработка берегов Вилейского водохранилища  
(фото В. Е. Левкевича)

К важнейшим условиям, влияющим на характер и интенсивность размыва, относятся: начальная форма и размеры берегового склона, конфигурация береговой линии и положение ее по отношению к волнообразующим направлениям, уровенный режим водохранилища, геолого-литологическое строение берегового склона, сопротивляемость размыву (размываемость) слагающих его пород и способность материала этих пород к накоплению в прибрежной зоне водоема и образованию вдольберегового потока наносов.

В общем случае участок берега в плане в пределах действия единого потока наносов можно рассматривать как динамическую систему, имеющую относительно самостоятельное развитие. В этой системе различаются зоны дефицита, транзита и зону аккумуляции наносов, где размыв берега в отдельных случаях происходит в начале эксплуатации водохранилища, а затем берег начинает развиваться по аккумулятивному пути. Обмен наносами между зонами осуществляется за счет миграции материала, т.е. местных и кратковременных подвижек наносов вдоль берега в том или ином направлении за счет ветрового волнения.

Натурное обследование ряда водохранилищ и водозаборных сооружений позволило установить нарушения в работе водозаборов, связанные с заилением и занесением продуктами осадконакопления и песчаным материалом, в результате вдольберегового перемещения и аккумуляции наносов в прибрежной зоне (таблица 1).

**Таблица 1** – Влияние потока наносов на эксплуатацию водозаборов

Название водохранилища	Место расположения водозабора	Наличие переработки берега	Наличие потока наносов	Расчетный расход наносов $Q_t$ , м <sup>3</sup> /мпог
Чижевское	Левый берег	-	-	-
Солигорское	Правый берег	+	+	0,22
Осиповичское	Левый берег	+	+	0,46
Млынокское	Правый берег	-	-	-
Жодинской ГЭС	Правый берег	+	+	0,44
Дрозды	Правый берег	+	+	1,51
Любанское	Правый берег	+	+	0,28
Дубровское	Правый берег	+	+	1,50
Лукомльское озеро	Правый берег	+	+	1,80

Установлено, что материал переработки естественных берегов, верховых откосов дамб и плотин со временем перемещается под комплексным воздействием ветрового волнения, колебания уровней и внутриводоемных течений, а также сил тяжести в чашу водоема. Этот процесс ведет к постепенному заилению и потере полезного объема водохранилищ [10–15].

Для оценки процесса заилении и поступления материала в чашу водоема были использованы опубликованные ранее данные обследования ряда водохранилищ страны (Солигорское водохранилище, Чижевское, Обстерно, Криницы, Дрозды, Вяча, Волковичи и др.) [4, 7, 9].

Анализ данных натурных исследований показал, что наблюдаются определенные различия в характере накопления вторичных отложений в водоемах разных типов: русловых, наливных и озерных. В русловых, имеющих вытянутую в плане форму (коэффициент удлиненности до 48,0), заиление идет от верховьев, характеризуемых русловым движением водного потока и наличием стоковых течений к плотине, где преобладает волновое движение, дрейфовые и вдольбереговые течения. Поэтому в верховьях преобладают крупнозернистые наносы, а в средней и нижней частях водохранилища – взвешенные тонкодисперсные частицы. Этим объясняется в значительной мере изменение мощности вторичных грунтов по длине водохранилищ. Мощность отложений в приплотинной части может увеличиваться до 10 раз по сравнению с верховьями водоемов. Однако интенсивность заиления водохранилища необходимо увязывать и с его проточностью. С увеличением величины условного водообмена уменьшается мощность донных отложений. Например, в приплотинной части Тетеринского водохранилища мощность отложений превышает в 3–5 раз отложения Осиповичского и Чигиринского. Это объясняется небольшими разгонами волн, укрытостью приплотинной части, соответственно, слабой гидродинамической активностью.

В наливных водохранилищах заиление происходит равномерно по всей площади ложа. Основными илообразующими материалами в отличие от русловых водохранилищ являются продукты абразии откосов дамб обвалования (до 70% длины береговой линии), а также остатки отмершей водной

растительности. Интенсивность этих процессов определяет динамику заиления, но для водохранилищ наливного типа он не ярко выражен во времени. Скорости заиления русловых и наливных водохранилищ заметно отличаются. Так средняя скорость накопления осадков в малых русловых водохранилищах за период их становления (18–25 лет) колеблется в пределах 0,25–1,40 см/год [4, 7, 9]. Интенсивность накопления осадков по ложу, русловой ложбине и понижениях микрорельефа ложа, а также в различных гидродинамических зонах может существенно различаться ( до 2,0 см/год) (таблица 2) [9].

**Таблица 2-** Характеристики накопления илов в водохранилищах

Водохранилище	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Мощность заиления, м		Скорость заиления	Объем заиления, млн. м <sup>3</sup>	
		наибольшая	средняя			
Чижевское	2,80	1,8	1,0	0,05	2,80	50,0
Волковичи	0,85	0,70	0,37	0,04	0,31	11,0
Петровичи	4,80	0,40	0,25	0,05	1,20	8,0
Чигиринское*	21,19	0,35	0,06	0,32	1,39	2,3
Осиповичское*	11,87	0,80	0,10	0,51	1,23	7,0
Саковщикское*	1,29	1,00	0,56	1,40	0,56	46,7
Локтыши	15,90	0,1	0,06	0,01	0,95	1,9
Бобруйковское	1,22	1,00	0,55	0,07	0,67	36,6
Млынокское	1,44	0,15	0,10	0,02	0,14	6,1
Волпянское*	1,20	1,50	0,48	0,04	0,58	27,0
Клястицкое*	1,25	0,90	0,65	0,03	0,55	25,5
Паперня*	1,80	1,00	0,27	0,03	0,52	30,6
Рачунское*	1,50	1,20	0,43	0,03	0,59	26,8

В наливных водохранилищах мощность донных отложений за 5–7 лет эксплуатации достигает 2–3 см, реже 5 см. Объем заиления малых водохранилищ Белоруссии за 18–25 лет эксплуатации составляет от 2–7 до 25–30 % полного объема водоемов.

Обобщение результатов натурного изучения процесса берегоформирования, заиления и седиментации на водоемах республики, рассмотренного в работах М. Я. Прытковой, А. И. Молдаванова, В. А. Скрыльникова, В. М. Широкова, И. И. Кирвеля, а также В. Е. Левкевича и др. авторов были получены полуэмпирические зависимости для расчета заиления водохранилищ [9]. Определено, что величина объема заиления в условиях рассматриваемого региона функционально зависит от ряда факторов [9]

$$R_0 = F_1(F_{\text{вдсб}}/F_{\text{в}}, B/L, W_{\text{смс}}/V_{\text{вдхр}}) F_2(T^b), \quad (1)$$

где  $R_0$  – объем заиления, млн. м<sup>3</sup>;  $F_{\text{вдсб}}$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $F_{\text{в}}$  – площадь зеркала водоема, км<sup>2</sup>;  $B/L$  – показатель формы водоема;  $B$  – ширина, км;  $L$  – длина водохранилища, км;  $W_{\text{смс}}/V_{\text{вдхр}}$  – коэффициент проточности;  $W_{\text{смс}}$  – объем среднесноголетнего стока, млн. м<sup>3</sup>;  $V_{\text{вдхр}}$  – полный объем водохранилища, млн. м<sup>3</sup>;  $T$  – время, лет;  $b$  – показатель степени, зависящий от распространения доминирующих грунтов водосбора.

Более поздние исследования по изучению динамики берегов прудов, малых водохранилищ и их заиления, проведенные В. Е. Левкевичем, позволили уточнить зависимость (1), которая с учетом развития береговых процессов – абразии и аккумуляции – может быть использована в инженерных и прогнозных расчетах:

$$R_0 = F_1(F_{\text{вдсб}}/F_{\text{в}}, B/L, W_{\text{см}}/V_{\text{вдхр}}, L_{\text{абр}}/L_{\text{акк}}) F_2(T^b) \quad (2)$$

Ниже рассмотрим особенности заиления на примере водохранилища Жодинской ТЭЦ на р. Плиса и его влияние на функционирование водозабора ТЭЦ [12]. В настоящее время на водосливной плотине гидроузла проведена реконструкция, смонтирована Жодинская Мини ГЭС. В связи с проведенной реконструкцией изменен режим работы водослива водохранилища, в результате этого прекращен поверхностный сброс воды через водосброс.

Для оценки степени заиления водохранилища были использованы данные, полученные автором магистерской диссертации Швабом П. А.: «Оптимизация работы поверхностных водозаборов водохранилищ ТЭЦ (на примере Жодинской ТЭЦ)» (БНТУ, 2023) и материалы обследования водоема, проведенные ЦНИИКИВР [12], которые послужили основой для определения мощности и характера распределения донных отложений. Измерения производились в четырех створах, начиная от плотины.

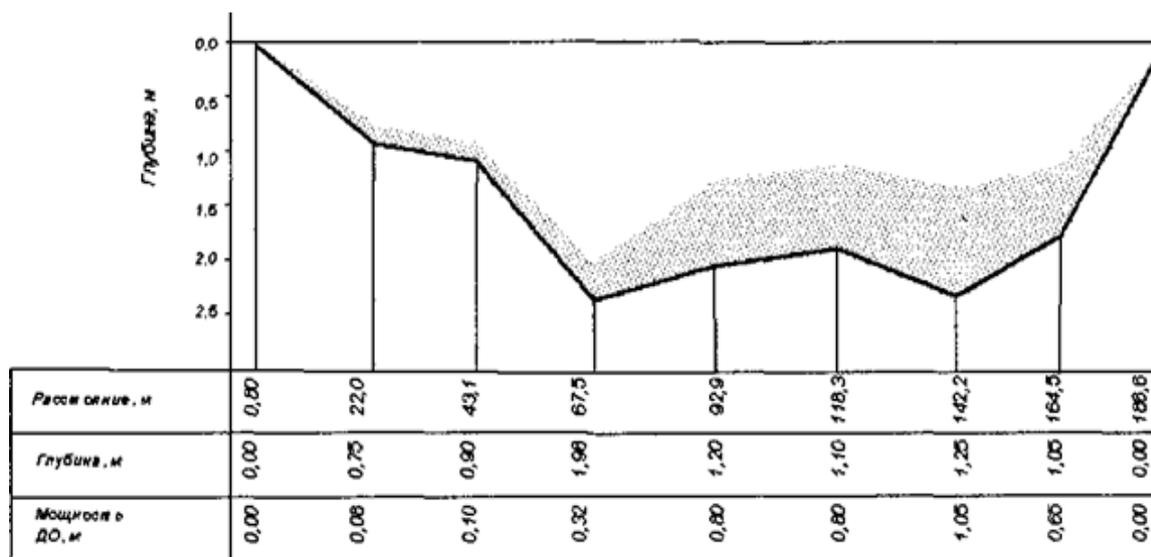
Полученные данные измерений мощности донных отложений и результаты расчета объема заиления водохранилища приведены в таблице 3 и рис. 3.

**Таблица 3** – Характеристика заиления водохранилища Жодинской ТЭЦ [12]

№ створа	Расстояние от плотины, м	Ширина в створе, м	Средняя глубина воды в створе, м	Средняя мощность донных отложений в створе, м	Площадь водного зеркала между створами, м <sup>2</sup>	Объем донных отложений, м <sup>3</sup>
1	70	158,3	1,85	1,09	14866,79	11893,43
2	171	188,1	1,85	0,83	21556,85	17892,19
3	320	185,8	0,97	0,52	38653,66	20099,90
4	581	143,0	0,82	0,50	41334,91	20667,76

Как видно из приведенных в таблице 3 данных, средняя мощность донных отложений составила 0,643 м, а средняя глубина воды – 1,36 м. Заиление на исследуемом участке водохранилища составляет 32,7 % от общего объема.

В целом для всей акватории водохранилища объем донных отложений составляет в процентном отношении от полного объема 38 %. Такая потеря полного объема водохранилища требует проведения инженерно-технических мероприятий по его очистке. Наибольшие мощности донных отложений наблюдаются у правого берега, где расположен водозабор и составляют более 1,0 м. Наибольшая мощность отложений наблюдается в верховье водоема. Такое распределение мощностей наносов в плане водохранилища осложняет эксплуатацию водозабора.



**Рисунок 3** – Заиление Жодинского водохранилища в створе №3 [12]

**Заключение.** Можно констатировать, что основными параметрами, влияющими на режим эксплуатации водозабора Жодинской ТЭЦ, являются: гидрологические характеристики, морфометрия водоема и строение береговой линии в плане и разрезе, а также динамика береговых процессов и заиления, влияющих на эксплуатацию поверхностного водозабора и его заносимость. Значительная потеря объема водохранилища (около 40%) осложняет режим водообмена водоема и требует проведения инженерных мероприятий по очистке ложа и водоприемной части водозабора.

#### Список цитированных источников

1. Матвеев, А. В. История формирования рельефа Беларуси / А. В. Матвеев. – Минск : Наука и техника, 1990. – 144 с.
2. Павловский, А. И. Закономерности проявления эрозионных процессов на территории Беларуси / А. И. Павловский. – Минск : Наука і техника, 1994. – 106 с.
3. Широков, В. М. Формирование малых водохранилищ гидроэлектростанций / В. М. Широков, П. С. Лопух. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 143 с.
4. Левкевич, В. Е. Динамика формирования берегов малых равнинных водохранилищ / В. Е. Левкевич // Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 149 с.
5. Прыткова, М. Я. Закономерности размещения и водообмена малых озер и малых водохранилищ / М. Я. Прыткова // География и природные ресурсы. – 1987. – № 3. – С. 96–101.
6. Кирвель, И. И. Пруды Беларуси как антропогенные водные объекты, их особенности и режим / И. И. Кирвель. – Минск : БГПУ, 2005. – 234 с.

7. Лопух, П. С. Закономерности развития природы водоемов замедленного водообмена, их использование и охрана / П. С. Лопух. – Минск : БГУ, 2000. – 332 с.
8. Михневич, Э. И. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич // Мелиорация. – 2016. – Т. 78. – № 4. – С. 18–23.
9. Левкевич, В. Е. Гидро - морфодинамика прибрежной зоны водохранилищ ГЭС Беларуси / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2018. – 143 с.
10. Михневич, Э. И. Повышение надежности функционирования водозабора Минской ТЭЦ–3 для технического водоснабжения из Чижовского водохранилища / Э. И. Михневич, П. К. Черник, Н. Н. Михалкович // Потенциал науки – развитию промышленности, экономики, культуры, личности : материалы междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. – Минск, 2002. – Т. 2. – 150 с.
11. Юлдашева, К.А. Опыт борьбы с заилением водохранилищ / К. А. Юлдашева. – Ташкент : Научно-информационный центр МКВК, 2011. – 73.
12. Отчёт о научно-исследовательской работе по договору № 25/2015 Проведение оценки изменения гидрологических параметров реки Плиса, водохранилища в г. Жодино и разработка правил эксплуатации водоёма с целью улучшения его экологического состояния,- Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР». – 40 с.
13. Михневич, Э. И. Водная система г. Минска и пути ее совершенствования / Э. И. Михневич // Изв. Белорусской инженерной академии – 2001. – № 1(11). – С. 64–69.
14. Михневич, Э. И. Роль водообмена в улучшении экологического состояния водохранилищ водной системы г. Минска / Э. И. Михневич // Международное сотрудничество в решении водно-экологических проблем : материалы III Междунар. водн. форума, Минск, 2–3 окт. 2008 г. – Минск, 2008. – С. 279–280.
15. Michniewicz, E. Gospodarowanie wodą w zlewniach zielonych płuc polski / E. Michniewicz // Zarządzanie zasobami wody w Republice Białoruś. – 2003. – № 34. – Nr. 47–57.