

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОДТОПЛЕНИЯ БЕРЕГОВ  
ВОХРАНИЛИЩА ВИТЕБСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
НАЗЕМНОЙ И ДИСТАНЦИОННОЙ СЪЕМОК**

*В. Е. Левкевич<sup>1</sup>, А. А. Артемчик<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> Аспирант, БНТУ, Минск, Республика Беларусь, [artemchik.aliaksandr@gmail.com](mailto:artemchik.aliaksandr@gmail.com)

**Аннотация**

Приведены результаты комплексной оценки масштабов подтопления прибрежных территорий водохранилища Витебской гидроэлектростанции, проведенные с помощью расчетных методов, наземных обследований и дистанционных съемок с беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** подтопление, прибрежная территория, водохранилище, беспилотный летательный аппарат.

**INTEGRATED ASSESSMENT OF THE FLOODING OF THE SHORE OF  
THE RESERVOIR OF THE VITEBSK HPP ON THE BASIS OF GROUND  
AND REMOTE SURVEY DATA**

*V. E. Levkevich, A. A. Artemchik*

**Abstract**

The results of a comprehensive assessment of the scale of the coastal areas flooding in the reservoir of the Vitebsk hydroelectric power station, carried out using computational methods, ground surveys and remote surveys from unmanned aerial vehicles, are presented.

**Keywords:** flooding, coastal area, reservoir, unmanned aerial vehicle.

**Введение.** Водоохранилища оказывают значительное влияние на прибрежные территории, что выражается в развитии различных негативных процессов, в частности, изменения гидрогеологических условий, вызванных подпором подземных вод, подтоплением и заболачиванием прибрежных территорий. На примере водохранилища Витебской гидроэлектростанции (далее – ГЭС), расположенной на р. Западная Двина, была отработана методика комплексной оценки воздействия подпора подземных вод на прилегающие территории с помощью как традиционных наземных и расчетных методов, так и методов исследований, основанных на использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

**Материалы и методы.** Водоохранилище, на котором проводились комплексные исследования, осуществляет сезонное регулирование стока, отно-

сится к русловому типу, имеет вытянутую форму протяженностью более 50 км и площадью зеркала более 800 га [1–3].

Методика исследований прибрежной зоны, подверженной подтоплению, состояла в проведении наземных съемок по заранее подготовленной системе разбитых контрольных створов и тех же участков территории съемке с помощью БПЛА и дальнейшему сравнению и сопоставлению результатов обследования. Для проведения дистанционной съемки использовался БПЛА – аппарат профессиональной серии – квадрокоптер модели DJI Phantom 3 Professional. Обработка полученных данных съемки выполнялась с помощью специального программного обеспечения.

Для оценки точности результатов, полученных в процессе обработки материалов аэросъемок с БПЛА, были привлечены материалы проводимого наземного мониторинга, полученные ранее [1–4].

Кроме того, для оценки точности результатов в работе использованы сравнительный, логический, системный и математический методы научного исследования. Картографические работы выполнены с применением средств Google Earth, Adobe Illustrator, ArcGIS.

**Результаты и обсуждение.** При наполнении водохранилища поднимающийся уровень водной поверхности оказывает значительное давление на водоносные горизонты в береговых склонах. Под действием гидростатического давления со стороны водоема сток (движение) подземных вод в подпертую реку прекращается. Одновременно вода из водохранилища начинает фильтроваться в затопленные почвы и грунты бортов речной долины. Скорость фильтрации будет зависеть от водопроницаемости грунтов. Показателем водопроницаемости служит коэффициент фильтрации –  $k_f$ . В результате инфильтрации из водохранилища уровень подземных вод в прибрежной зоне постепенно повышается [4–7].

Таким образом, в результате строительства гидротехнических подпорных сооружений поверхность подземных вод вблизи водохранилища приобретает криволинейную форму. Со временем, с одной стороны, за счет фильтрации, с другой – за счет постоянного притока с окружающей суши, запасы подземных вод на побережье увеличиваются, а уровень их постоянно поднимается.

Итак, на одних участках прибрежной зоны водохранилища зона влияния достигает своих максимальных размеров уже в первые годы функционирования, на других – процесс подпора растягивается на последующий период эксплуатации. Изменения уровня верхнего бьефа водохранилища передаются подземным водам. Внешняя граница зоны подтопления, где колебания уровня подземных вод затухают, в условиях небольших равнинных водохранилищ может быть расположена на расстоянии до 1–3 км от уреза верхнего бьефа водохранилища.

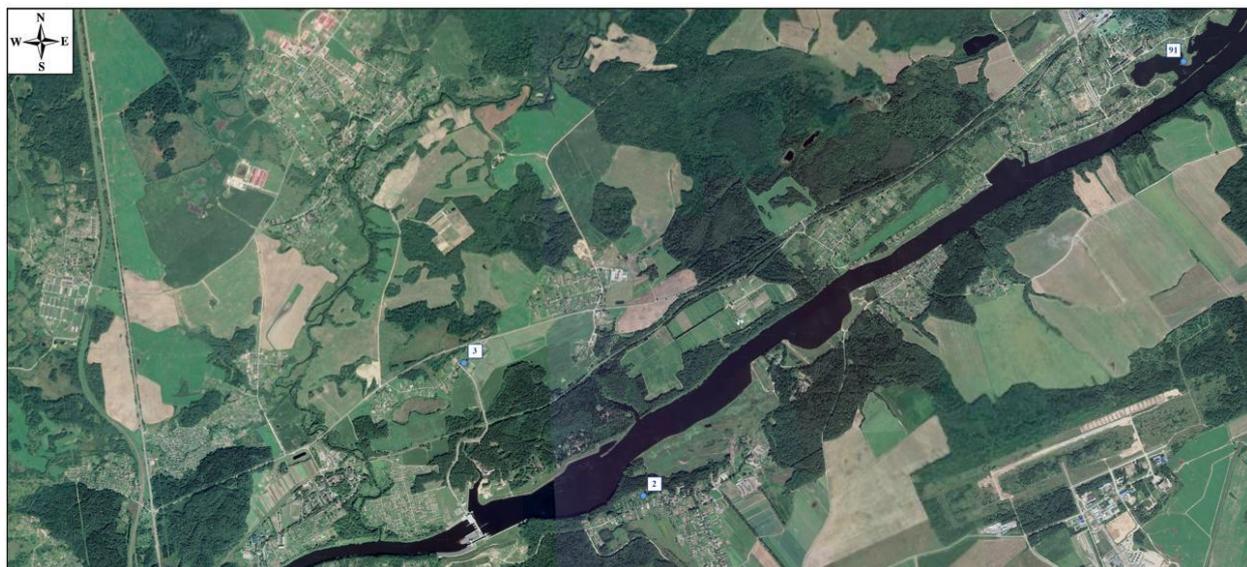
В зависимости от высоты подтопления (залегания уровня грунтовых вод от поверхности земли), трансформации почв и растительности выделяют подзоны сильного, умеренного и слабого подтопления, влияние которых на прибрежные экосистемы, почвенные условия, лесные и сельскохозяйственные угодья

неоднозначно и определяется природными особенностями района. Залегание уровня грунтовых вод от поверхности земли ориентировочно может составлять в подзоне сильного подтопления от 0 до 1,2 м, умеренного – до 2 м, слабого – до 3,0 м.

Общая площадь подтопления земель прибрежных территорий равнинными водохранилищами в зависимости от природных условий может составлять до 15 % площади водохранилища [1,6–8].

Как уже отмечалось, водные объекты оказывают существенное воздействие на режим подземных вод и прилегающие к водохранилищу прибрежные территории, что выражается в подтоплении и заболачивании земель, изменении режима грунтовых и подземных вод. Зарегистрированная максимальная ширина распространения подпора грунтовых вод в береговой зоне водохранилищ Беларуси достигает 2,0 км [1].

В качестве натуральных данных для прогноза авторы рассматривают возможность использования материалов обследования скважин и шахтных колодцев, а также данные, полученные в результате дистанционных съемок с БПЛА. Ниже на рисунке 1 приведена схема расположения точек контроля уровня грунтовых вод (скважин и шахтных колодцев) и контрольных створов, построенных через них, для которых выполнялся прогноз подтопления территорий.



**Рисунок 1** – Схема водохранилища Витебской ГЭС и точек контроля УГВ

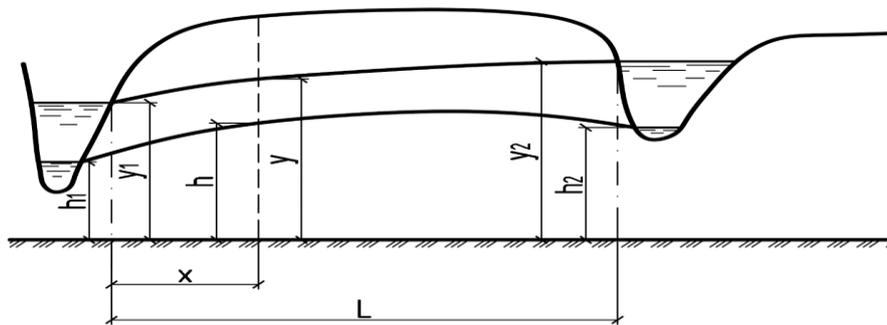
Расчет подпора уровня грунтовых вод (УГВ) выполнялся для контрольных створов (5 единиц), расположенных на обоих берегах водохранилища (рисунок 1).

При горизонтальном залегании водоупора, типичном в условиях равнинных водохранилищ Беларуси, прогноз подпора грунтовых вод выполнялся по формуле Г. Н. Каменского для случая установившегося движения грунтовых вод [6, 7],

$$y = \sqrt{h^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L-x}{L} + (y_2^2 - h_2^2) \frac{x}{L}}, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина потока грунтовых вод до подпора в расчетном сечении, находящемся на расстоянии  $x$  от берега первого водного объекта;  $y$  – то же, при подпоре;  $h_1$  – глубина потока грунтовых вод у первого объекта до подпора;  $y_1$  – то же, после подпора;  $h_2$  – глубина потока грунтовых вод во втором объекте до подпора;  $y_2$  – то же, после подпора;  $L$  – расстояние между водными объектами.

Все величины, используемые в формуле 1, измеряются в метрах и показаны на рисунке 2. В рассматриваемом случае первым водным объектом, изображенным на схеме, является водохранилище руслового типа. Вторым водным объектом может быть как другое водохранилище, пруд, река или залив первого водохранилища, где производятся измерения уровня грунтовых вод.



**Рисунок 2** – Схема подпора грунтовых вод (общий случай)

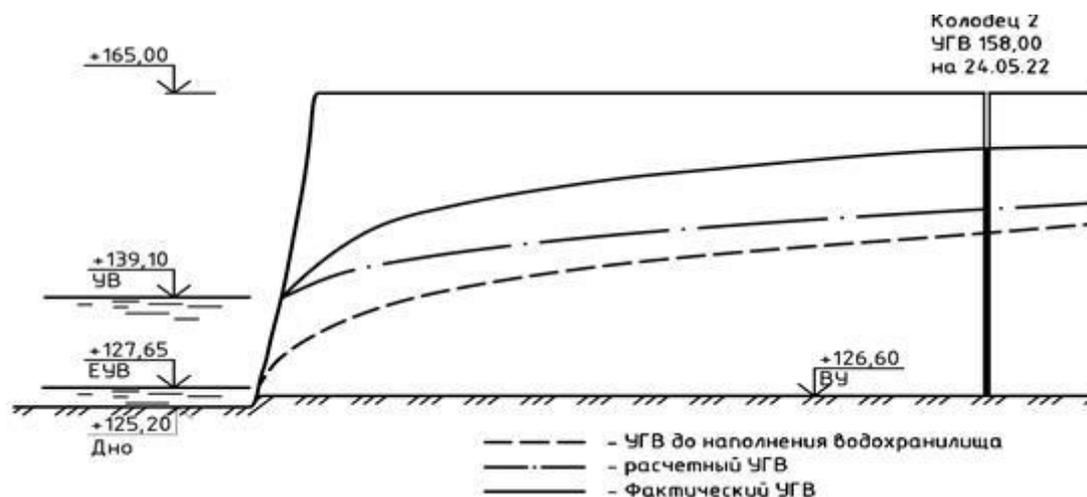
В условиях водохранилища, когда уровень воды во втором водном объекте не изменяется или изменяется незначительно, расчет производится по упрощенной формуле вида [6, 7]:

$$y = \sqrt{h^2 + (y_1^2 - h_1^2) \frac{L-x}{L}}, \quad (2)$$

В качестве исходной  $L$  была принята величина  $L=1200$  м. Считается, что на таком расстоянии влияние колебания уровня воды в водохранилищах на УГВ сказывается незначительно.

Некоторые результаты проведенных прогнозных расчетов приведены ниже на рисунках 3, 4 и в таблицах 1 и 2. На данных рисунках показаны: створ 2 (д. Подберезье) и створ 3 (д. Букатино).

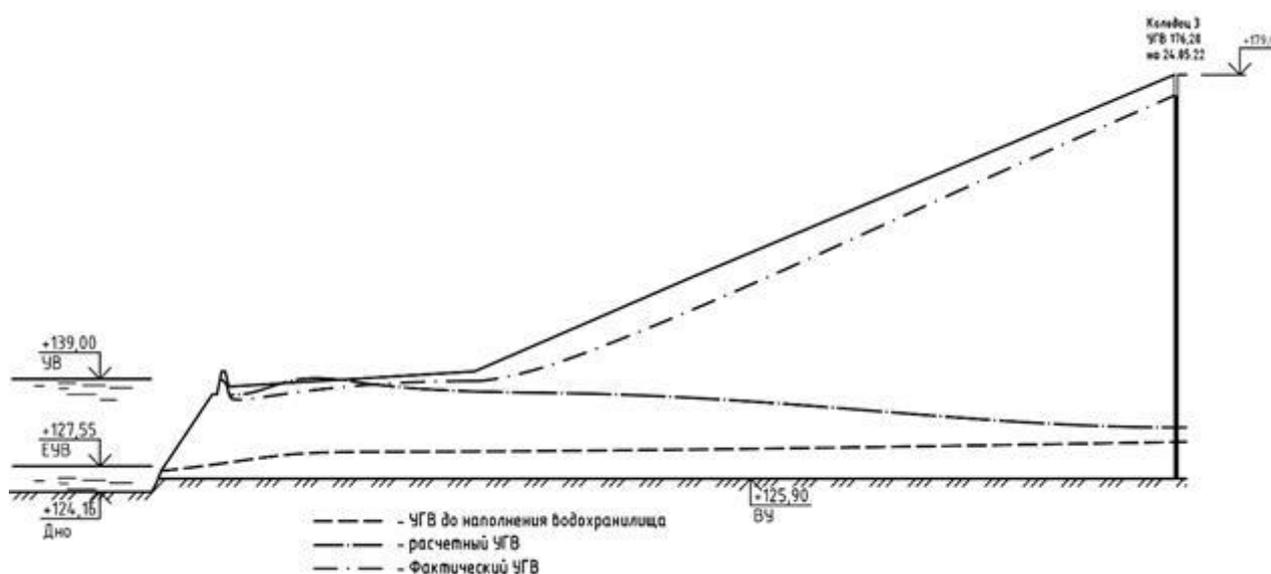
В геологическом строении данных участков принимают участие в основном современные аллювиальные отложения (aIV), представленные песками разного грансостава от пылеватых до гравелистых, часто глинистых, с прослоями и линзами супесей и суглинков, в основном, пылеватых. Грунтовые воды вскрыты как в пределах низкой поймы, так и на склонах долины на абсолютных отметках 131,93–142,30 м.



**Рисунок 3** – Положение кривых депрессии в створе № 2

**Таблица 1** – Расположение расчетных точек и их характеристики

Расстояние от уреза ВДХР, м	20	40	80	160	265
УГВ до наполнения ВДХР	135,67	138,12	141,04	144,44*	147,23
Расчетные значения ВДХР	141,82	143,42	145,39	147,93	150,14



**Рисунок 4** – Положение кривых депрессии в створе № 3

**Таблица 2** – Расположение расчетных точек и их характеристики

Расстояние от уреза ВДХР, м	100	200	500	800	1320
УГВ до наполнения ВДХР	129,1	129,43	129,51*	129,92*	130,72
Расчетные значения ВДХР	138,81	138,46	137,1	135,6	132,63

В период 2021–2022 г.г. были проведены дистанционные съемки по обоим берегам водохранилища. Съемки выполнялись в период стояния отметок нормального подпорного уровня (НПУ), высота съемок при этом колебалась от 75 до 100м [1, 8, 9]. Съемка высокого разрешения побережья водохранилища с

последующей комплексной обработкой и анализом данных наземных полевых обследований и дистанционных материалов позволили установить зоны фактического подтопления территории, сравнить с прогнозными показателями и их уточнить на основе измеренных знаний по контрольным створам и данным скважин, а также шахтных колодцев.

Маркерами, позволившими при съемке с БПЛА определить ширину зоны подтопления, являлись ореолы травянистой и древесной растительности, которые коррелируют с шириной зон подтопления в зонах заболачивания определенной цветовой гаммы. Предварительная обработка видео и фотоматериалов полевых исследований показала, что ширина зоны подтопления колеблется от 50 м до 500 м и может достигать 1300 м (правый берег водохранилища) (рисунок 5).



**Рисунок 5** – Правый берег. Створ 5

Граница распространения подпора подземных вод и подтопления берегов при анализе видео и фотоматериалов определялась по данным анализа съемок с БПЛА путем выявления полос изменения цвета и насыщенности цветовой гаммы травянистой и древесной растительности [10–12].

Последний этап работы состоял в комплексном анализе прогнозных и натурных данных. Сравнительный анализ данных, полученных при наземных измерениях, прогнозных расчетах и данных, полученных в процессе обработки снимков с БПЛА, приведен в таблице 3.

Как видно из приведенных результатов (таблица 3), точность зафиксированных параметров объектов, подверженных съемкам с БПЛА, а именно значения ширины зоны подтопления являются достаточной, обеспечивающей среднюю погрешность в пределах 15 %, что является допустимой для проведения практических инженерных расчетов [13].

**Таблица 3** – Сравнение результатов прогнозных расчетов подпора подземных вод в прибрежной зоне и данных, полученных при съемке с БПЛА

Водохранилище Витебской ГЭС	Прогноз подпора УГВ по створам			Расчетные, м	Данные съемки с БПЛА	Погрешность абсолютная, %
	Высота подпора на расчетном расстоянии м от уреза воды, м			Ширина зоны подтопления, м	Ширина зоны подтопления, м	
	прогноз	фактическая	погрешность			
Участок 2	19.0	11.0	42	265	250	5.7
Участок 3	37.28	19.9	48	1320	1200	9.1
Участок 5 Артскважина	10,0	9.0	10	67	60	10.4
Участок 91	5.57	4.9	12	80	75	6,3

**Заключение.** На основе материалов натуральных обследований и наблюдений, а также съемок с БПЛА были определены прогнозные зависимости, достаточные для моделирования береговых процессов и подтопления территорий, вызванного подпором грунтовых вод. Показано, что поведение комплексного прогнозирования, натурального обследования и аэрофотосъемок с БПЛА позволяют объективно оценивать степень подтопления и заболачивания прибрежных территорий русловых водохранилищ.

#### Список цитированных источников

1. Левкевич, В. Е. Инженерная защита и мониторинг прибрежной зоны водохранилищ Беларуси: / В. Е. Левкевич. – Минск : Право и экономика, 2020. – 152с.
2. Абрамов, С. К. Защита территорий от затопления и подтопления / С. К. Абрамов [и др.] /– М. : Госстройиздат, 1961. – 424с.
3. Шевелюк, А. А., Левкевич, В. Е. Оценка влияния малых водохранилищ на ландшафты верхнего и нижнего бьефов с помощью дистанционных методов // География и природные ресурсы. «Наука», Новосибирск, СО АН СССР, 1990. – С.136–139.
4. Вендров, С. Л., Роль водохранилищ в изменении природных условий // С. Л. Вендров, А. Б. Авакян, К. Н. Дьяконов, А. Ю. Ретеюм / М. : Изд-во «Знания», 1968. – 47 с.
5. Вендров, С. Л. Изменение рельефа берегов и дна Цимлянского водохранилища в 1952–1956 гг. // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. – 1957. – № 3. – С. 75–80.
6. Бейром, С. Г. Методические рекомендации по изучению и прогнозированию подпора подземных вод и переработке берегов водохранилищ Сибири // С. Г. Бейром, Л. Н. Каскевич, И. К. Невечера, В. М. Широков / СибНИИЭ, Новосибирск, 1972. – 290 с.

7. Емельнов, А. Г., Методические рекомендации по прогнозированию подтопления берегов водохранилищ и использованию подтопленных земель // А. Г. Емельнов, Д. П. Финаров, Г. Н. Петров, Г. А. Михацлова ВНИИГ, Ленинград : 1978. – 88 с.

8. Левкевич, В. Е., Использование средств дистанционной диагностики для мониторинга состояния водохозяйственных объектов и сооружений систем водоснабжения и водоотведения // В. Е. Левкевич, В. А. Лосицкий, Ф. Н. Саидов, В. А. Мильман, С. В. Решетник / Экологическая безопасность. 1991–2021. : сборник материалов научно-практической конференции, посвященной юбилейной дате образования РУП «Бел НИЦ «Экология», БелНИЦ «Экология». – Минск, 2021. – С. 58–62.

9. Руководство по изучению динамики размыва берегов рек при инженерных изысканиях методом наземной фототопографической съемки. – Москва : Стройиздат, 1983. – 67 с.

10. Скрипка, Г. И., Беспалова, Л. А., Ивлиева, О. В., Сапрыгин, В. В., Филатов, А. А. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга положения бровки высоких берегов водохранилищ. // Г. И. Скрипка, Л. А. Беспалова, О. В. Ивлиева, В. В. Сапрыгин, А. А. Филатов / Водные ресурсы России: современное состояние и управление : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. г. Сочи 08–14 октября 2018 г. – Новочеркасск : ЛИК, 2018. – С 298–305.

11. Болсуновский, М. А., Система спутников ДЗЗ SPOT // География. – № 3. – 2005. – С. 19–21.

12. Копосов, Е. В., Соболев, И. С., Ежков, А. Н. Прогнозирование абразионной и оползневой опасности побережий Волжских водохранилищ // Е. В. Копосов, И. С. Соболев, А. Н. Ежков / Гидравлика. Инженерная гидрология. Гидротехническое строительство. Нижний Новгород. – Вестник МГСУ. – 2013. – № 6. – С.170–176.

13. Левкевич, В. Е. Оценка параметров зоны подтопления прибрежных территорий водохранилищ Беларуси с помощью беспилотных летательных аппаратов / В. Е. Левкевич, В. А. Мильман, С. В. Решетник, А. А. Артемчик. – Мелиорация. – 2023. – № 1. – С. 22–33.