

# TECHNOLOGY OF FLOOD WATER ZONES MODELING IN DOWNSTREAM POOL OF HYDROELECTRIC POWER STATION AT STRONG FLOW THROUGH ITS WATER ABSTRACTION POINTS

*Andrey S. Gachenko<sup>1</sup>, Alexei E. Hmelnov<sup>1</sup>,  
Nikolay V. Abasov<sup>2</sup>, Evgeny N. Osipchuk<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia

## **Abstract**

The article provides a technology for estimating of potential flooding areas in the lower pool of the Irkutsk HPP at high mandatory water flow expenses through its water abstraction points, that probability has increased significantly since 2001, following the adoption by the Government of Russian Federation of a decree on strict control limits of Lake Baikal level within 456-457 m (in Pacific reference system). The article offers investigation on structure and method of digital modeling of the relief of the Angara river within 67 km in conditions of limited information (inaccuracy of the underwater and above-water relief).

*Keywords: flooding, expenditure, digital relief, morfostrvor, coastline, morphing*

# ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ИРКУТСКОЙ ГЭС ПРИ ВЫСОКИХ РАСХОДАХ ЧЕРЕЗ ЕЕ ГИДРОСТВОРЫ

*Гаченко А.С.<sup>(1)</sup>, Хмельнов А.Е.<sup>(1)</sup>, Абасов Н.В.<sup>(2)</sup>, Осипчук Е.Н.<sup>(2)</sup>*

<sup>1</sup> Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup> Институт систем энергетики СО РАН, Иркутск

В работе приводится технология формирования оценок потенциальных зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС при высоких вынужденных расходах воды через ее гидростворы, вероятность которых существенно возросла с 2001 года после принятия Постановления Правительства РФ о жестких границах регулирования уровня озера Байкал в пределах 456-457 м (в тихоокеанской системе отсчета). Рассматривается структура и способ построения цифровой модели рельефа участка р. Ангара в пределах 67 км в условиях ограниченной информации (неточность подводной и надводной частей рельефа).

*Ключевые слова:* затопление, расход, цифровой рельеф, морфоствор, береговая линия, морфинг.

**Введение.** Уровень оз. Байкал определяется притоком воды крупными и средними реками в него впадающих, а также расходом воды через гидростворы Иркутской ГЭС (ИГЭС), за время эксплуатации которой максимальный расход составил  $4180\text{ м}^3/\text{с}$  в 1973 году в течение суток, что привело к значительным затоплениям в ее нижнем бьефе.

Согласно техническому проекту ИГЭС (1951 г.), в экстремальных случаях (менее 1% обеспеченности) допускаются расходы до  $6000\text{ м}^3/\text{с}$ .

Данная работа направлена на формирование прогноза зон возможного затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС с оценками ущербов в условиях экстремальной водности на оз. Байкал и притоках р. Ангары.

**Подход к определению зон затопления.** В настоящее время в нижнем бьефе ИГЭС имеется несколько водопостов для ежедневного измерения уровней. Русло р. Ангара протяженностью более 100 км до начала Братского водохранилища имеет довольно сложную структуру с множествами островов, заводей, протоков и впадений в нее крупных и мелких речек. Наиболее опасной с точки зрения затопления является зона от плотины ИГЭС до г. Ангарск протяженностью 67 км. Перепад уровня реки на этом участке составляет около 22 м, что соответствует средней скорости понижения  $0.3\text{ м}/\text{км}$ .

Учитывая сложность и опасность проведения экспериментов по высоким сбросам через гидростворы ИГЭС, а также большие затраты на проведение регулярных измерений уровня реки по всему участку с уточнением границ урезов воды (береговых линий), требуется построение одной или нескольких моделей ее течения для формирования оценок потенциальных зон затопления. Постоянный космомониторинг указанного района позволяет уточнять границы береговых линий с точностью в несколько метров. Показатели сканирования прибрежного рельефа реки также постоянно уточняются.

В этой связи базовой основой моделирования установившегося (и неустановившегося) течения является построение адекватной трехмерной модели подводной части реки и ее сопряжения с обобщенными цифровыми моделями (из разных источников) надводной части.

При достаточно точной настройке модели течения с использованием базовых гидравлических расчетов по заданным береговым линиям и расходам реки вдоль ее русла можно формировать оценки потенциальных зон затопления.

**Формирование цифровой модели рельефа реки.** В ходе выполнения проекта по расчёту зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС возникла необходимость получения модели рельефа, учитывающей форму речного дна. Если надводный рельеф с разной степенью детализации представлен на топографических векторных электронных картах различных масштабов, то информацию о подводном рельефе реки Ангары в электронном виде найти не удалось. Существующие данные о глубинах для некоторых навигаторов имеют фрагментарный характер и по отзывам специалистов не отличаются какой-либо точностью.

Рельеф дна континентальных водоемов редко отображается на топографических картах, очень мало свежей информации о глубинах рек и даже достаточно крупных водоемов. Отсутствие изображения рельефа дна объясняется трудоемкостью проведения промеров. Точные и массовые промеры дна водоемов начали осуществляться только с появлением ультразвуковых способов измерения (эхолотирования). Ультразвуковые способы промеров дна требуют проведения непосредственных измерений с поверхности водоема. Стоимость промеров глубин остается достаточно высокой, поэтому съемки дна проводятся только по мере научной или практической необходимости с достаточным объемом финансирования. В настоящее время для больших пространств судоходных участков рек, озер и водохранилищ рельеф дна наиболее детально и полномасштабно отображается на специальных навигационных картах (лоциях). Смысловая нагрузка и содержание навигационных карт подчинены целям безопасности судоходства, что ограничивает их применение в других отраслях хозяйственной деятельности.

Область построения цифровой модели рельефа дна определяется пространственными границами объекта исследования. В нашем случае она ограничивается береговой линией. Проектный уровень, к которому приводятся измеренные глубины, не соответствует положению береговой линии, которая имело место в процессе измерений. Информация о положении береговой линии определяется синтетическим методом. Для этой цели используются фотопланы, топографические карты, непосредственные измерения с помощью лазерного дальномера или информация о расстоянии от края границы промерного галса до уреза воды. Вследствие этого окончательное положение линии уреза берега при проектном уровне было представлено в «бумажной» форме. Поэтому для использования ее при построении численной модели рельефа применялись процедуры интерактивной оцифровки. По причине того, что положение береговой линии постоянно меняется из-за колебания уровней воды, то для получения однозначного результата необходимо производить согласно значениям срезки уровня на день проведения промеров. Объект исследования, которым является река, имеет вытянутую форму, поэтому цифровые модели строятся на небольшие отрезки реки в соответствии с размером листа составляемой карты.

Единственным достоверным источником по глубинам р. Ангара оказался атлас, который распространяется в бумажном виде. В связи с этим возникла необходимость оцифровки представленных там карт и их совмещения с имеющейся топоосновой.

Оцифровка бумажного Атласа карт реки Ангара (рис. 1) была проведена при помощи свободно распространяемого векторизатора картографических изображений Easy Trace 7.99. Были оцифрованы: изолинии глубин, отметки точек глубины, береговая линия.

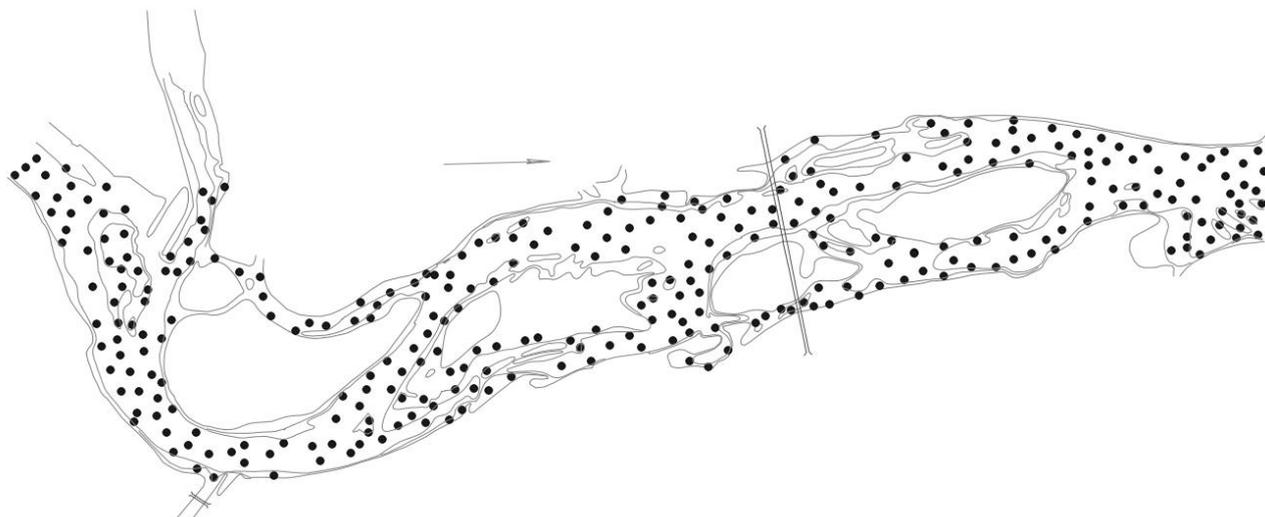


Рис. 1. Результат оцифровки фрагмента р. Ангара.

Листы атласа ориентированы в произвольных направлениях с целью наиболее компактного размещения участков реки на страницах. Для их дальнейшего использования были выполнены поворот и сдвиг в систему координат карты, содержащей модель рельефа. Для выбора параметров поворота проводилось сопоставление характерных точек контуров береговых линий (мысы, заливы, оконечности островов и т.д.) двух карт. Была реализована вспомогательная программа, которая вычисляет параметры преобразования по заданному списку пар координат точек и выполняет преобразование карты. Для поиска параметров преобразования используется метод наименьших квадратов. Для работы метода достаточно задать две пары соответствий точек, но использование большего их числа позволяет получить более точный результат, а также оценить эту точность по среднеквадратичному отклонению. Среднеквадратичное отклонение по заданным примерам при этом составляло 25-70 м. Величина отклонения объясняется наличием существенных расхождений контуров, поскольку эти расхождения могут затрагивать и используемые для задания соответствия карт характерные точки.

Попытка совмещения контуров векторизованной береговой линии с береговой линией топоосновы показала, что используемый атлас был подготовлен схематично, без привязки к какой-либо карте. Т.е. в атласе отражаются характерные изгибы береговой линии, но совместить эту линию с более точным контуром посредством поворота и сдвига невозможно. Опыт использования вычисляемого по сопоставленным характерным точкам преобразования поворота и сдвига показал, что получаемый результат уже не удаётся заметно улучшить дальше путём уточнения параметров преобразования.

Для того, чтобы сделать возможным использование для построения модели рельефа недостаточно точных данных, было разработано программное обеспечение для морфинга электронных карт. Для выполнения морфинга необходимо найти непрерывное преобразование плоскости, которое может совместить неточные контура береговых линий с более точными. Слои береговых линий используются для совмещения карт потому, что они присутствуют на обеих картах. После этого то же преобразование применяется к другим слоям карты подводного рельефа (изобатам и отметкам глубин). Полученные в результате данные оказываются лучше согласованными с информацией о надводном рельефе.

**Моделирование зон затопления для установившегося режима р. Ангара.** Установившийся режим р. Ангара на исследуемом участке ИГЭС-Ангарск устанавливается через 10-15 часов после задания режима сброса воды через створы ИГЭС. При высоких расходах (более 4000 м<sup>3</sup>/с), установившийся режим будет иметь вид квазиустановившегося со значительными отклонениями за счет: размыва берегов, изменения подводного рельефа реки, колебаний притока р. Иркут, изменения скоростей реки из-за различного сопротивления дна и по ряду других возможных причин. В этой связи, модель зон потенциальных затоплений носит оценочный характер, требующей детальных исследований при высоких расходах.

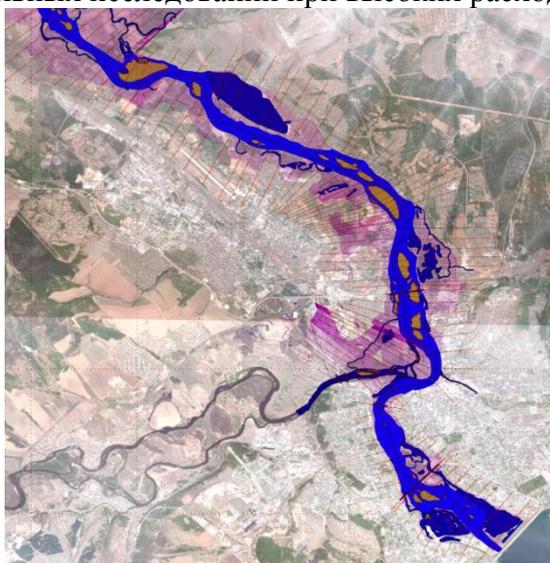


Рис. 2. Морфостворы.

Для расчета зон затопления была разработана оригинальная модель в виде задания большого набора базовых морфостворов (рис. 2), отражающих основные разветвления/соединения ее рукавов и находящихся на расстояниях 400-700 метров друг от друга. Морфостворы выбирались таким образом, чтобы их продолжения вдоль левого и правого берегов не пересекались при поднятии уровня до 5-ти метров. Весь участок ИГЭС – г. Ангарск разбит на 4 зоны.

На основе выбранных направляющих морфостворов сформированы контуры их поперечных сечений в виде зависимости высоты от расстояния до крайней точки левого берега морфоствора. Предполагается, что уровень воды вдоль всех водных участков морфоствора является одинаковым.

**Технология расчёта зон затопления.** Методом итераций для малого изменения уровня реки проведены расчеты указанных показателей с задаваемой ошибкой по заданным и рассчитанным расходам.

Для заданного расхода выполнен расчет морфометрических характеристик для каждого из морфостворов, начиная с последнего, для которого определяется уровень на основе средней скорости по формуле Шези. Коэффициенты шероховатости для начальных расчетов разделены на 2 части: русловую в диапазоне 0.02 – 0.05 и пойменную в диапазоне 0.05 – 0.07. Уточнение коэффициентов шероховатости производится через верификацию уровней для нескольких гидрологических пунктов (ИГЭС, о. Юность, г. Иркутск, речной порт, Боково, Ангарск) по имеющимся статистическим показателям суточных уровней р. Ангара (1971, 1973, 1983 гг.).

После итерационных процедур уточнения уровня в каждом базовом морфостворе формируется структура их характеристик, на основе которых определяются параметры промежуточных морфостворов с равномерным по длине изменением уровня водной поверхности и проверкой гидравлических показателей.

**Заключение.** В результате данной работы на основе данных цифровой модели было выполнено моделирование границ зон затопления в нижнем бьефе для установившегося режима р. Ангара при разных расходах через гидротехнические сооружения Иркутской ГЭС (от 3000 до 6000 м<sup>3</sup>/с учётом расхода р. Иркут). По результатам проведенного моделирования были определены границы береговых линий р. Ангара на участке от Иркутской ГЭС до г. Ангарск, построены карты зон затопления с использованием космических снимков из открытых картографических источников (рис. 3) и цифровых карт различных масштабов, по которым сформирован предварительный перечень объектов потенциального риска затоплений с нанесением контуров затопления при различных режимах водности.

Данная методика позволяет проводить регулярное обновление расчетов при уточнении данных цифрового рельефа и показателей расходов через створы ГЭС в режиме реального времени.



Рис. 3. Пример визуализации зон затопления при различных расходах Иркутской ГЭС.

*Работа выполнена при поддержке Центра коллективного пользования ИНЦ ФАНО (ЦКП ИРНОК <http://net.isc.irk.ru/>), в рамках грантов РФФИ № 16-37-00411, проектов Программы № 1.33П фундаментальных исследований Президиума РАН и интеграционной программы «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей» № 0341-2016-001.*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Никитин В.М., Савельев В.А., Бережных Т.В., Абасов Н.В. Гидроэнергетические проблемы озера Байкал: прошлое и настоящее // Регион: экономика и социология. 2015. № 3(87). С. 273-295.
- [2] Бычков И.В., Никитин В.М. Регулирование уровня озера Байкал: проблемы и возможные решения // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 5-16.
- [3] Абсов Н.В., Осипчук Е.Н., Никитин В.М., Бережных Т.В. Формирование и визуализация зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС / Актуальные проблемы науки Прибайкалья, вып. 1. Иркутск: Изд. Института географии СО РАН, 2015. С. 6-12.
- [4] Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. 2015. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 340 с.
- [5] Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 308 с.