

В.М. НИКИТИН*, Е.Н. ОСИПЧУК*, Н.В. АБАСОВ*, В.М. БЕРДНИКОВ*, В.С. ГАСАН*,
В.Р. ЧУПИН**, М.В. МОРОЗ**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия, nikitin1310@mail.ru, osipchuk@isem.irk.ru,
nva@isem.irk.ru, berdvm98@gmail.com, viktor-gasan@yandex.ru

**Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия, chupinvr@istu.edu, morozmariyav@gmail.com

РИСКИ ЗАТОПЛЕНИЯ НИЖНЕГО БЬЕФА ИРКУТСКОЙ ГЭС ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ УРОВНЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Приведены результаты исследований по моделированию границ зон затопления и оценке ущербов в нижнем бьефе Иркутской ГЭС при пропуске повышенных расходов воды через ГЭС, которые возможны в многоводные годы при превышении уровня оз. Байкал выше установленного диапазона. Дано описание модели рельефа и используемых источников данных. Представлена разработанная гидравлическая модель установившегося течения р. Ангара в виде автоматической генерации большого числа морфосторов с расчетом их характеристик. В современных условиях затопления в нижнем бьефе наблюдаются уже при расходах Иркутской ГЭС 2800 м³/с, причем основная часть возможных затоплений приходится на г. Иркутск. Для верификации результатов были использованы фактические данные космоснимков. Представлены оценки площадей затопления и объекты, попадающие под затопление при различных расходах Иркутской ГЭС. На основании рассчитанных площадей объектов и протяженности инженерных коммуникаций, попадающих в зоны затопления при пропуске расходов Иркутской ГЭС в диапазоне 2800–6000 м³/с, были определены социально-экономические ущербы и потери природных ресурсов по нижнему бьефу в целом. Результаты расчетов показали существенный рост ущербов начиная с расхода Иркутской ГЭС 4000 м³/с, а наиболее значительный — с расхода 4500 м³/с. Полученные результаты ущербов от повышенных расходов Иркутской ГЭС сопоставлены с оценками ущербов в верхнем бьефе, которые возможны при повышении уровня оз. Байкал при аналогичных условиях водности. Для верхнего бьефа критическим уровнем является отметка 457,20 м ТО, для нижнего бьефа критический расход составляет 4000–4500 м³/с. Данные уровни и расходы находятся в зоне сопоставимых ущербов в верхнем и нижнем бьефах и имеют обеспеченность около 2 %.

Ключевые слова: площади затопления, модель рельефа, гидравлическая модель, ущербы, водность, режимы ГЭС.

V.M. NIKITIN*, E.N. OSIPCHUK*, N.V. ABASOV*, V.M. BERDNIKOV*, V.S. GASAN*,
V.R. CHUPIN**, M.V. MOROZ**

*Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 130, Russia, nikitin1310@mail.ru

**Irkutsk National Research Technical University,
664074, Irkutsk, ul. Lermontova, 83, Russia, chupinvr@istu.edu

RISKS OF DOWNSTREAM FLOODING OF IRKUTSK HPP IN REGULATING THE LAKE BAIKAL LEVEL

This paper presents findings on modeling the flood zone boundaries and assessing the resultant damage in the downstream of the Irkutsk Hydro Power Plant (HPP) due to high water flows through the HPP which are possible in high-water years when the Lake Baikal level goes beyond the established range. A description of the relief model and the data sources used are provided. The hydraulic model of steady flow of the Angara River, which is developed in the form of automatic generation of a large number of cross-sections by calculating their characteristics, is presented. Currently, downstream flooding is observed when flow rate of Irkutsk HPP is 2800 m³/s (the bulk of possible flooding occurs in the city of Irkutsk). The results were verified using actual satellite image data. The paper presents the estimates of flooded areas and objects (buildings, structures) susceptible to flooding at various flow rates of the Irkutsk HPP. Based on the estimates obtained for the areas of the objects and the length of utility lines, which fall into the flood zones when the flow of Irkutsk HPP ranges from 2800 to 6000 m³/s, socioeconomic damage and losses for the downstream pool as a whole were determined. The results showed an increase in the damage starting with a flow rate of

Irkutsk HPP of 4000 m³/s and its much higher increase with a flow rate of 4500 m³/s. The estimates obtained for the of damage due to elevated flow rates of Irkutsk HPP are compared with the estimates of damage in the upstream pool, which can occur when the level of Lake Baikal rises under similar water conditions. The critical level for the upstream pool is 457,20 m (according to the Pacific Elevation System). The critical flow rate for the downstream pool is 4000–4500 m³/s. These levels and flow rates are within the range of comparable damage in the upstream and downstream pools and have a probability of about 2 %.

Keywords: *flood areas, relief model, hydraulic model, damage, water content, HPP regimes.*

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Байкал, Иркутское водохранилище, Иркутская ГЭС и нижний бьеф представляют собой единую взаимосвязанную природно-техническую и социально-экономическую систему. Каждая часть этой системы имеет свои особенности и возможные риски в верхнем и нижнем бьефах, возникающие при изменении расхода воды через Иркутскую ГЭС и регулировании уровенного режима оз. Байкал и Иркутского водохранилища [1–5]. Риски многоводных периодов наиболее опасные. В ходе них происходят повышенные расходы через Иркутскую ГЭС с затоплением территорий в нижнем бьефе в русле р. Ангары при одновременном форсировании уровня оз. Байкал выше нормальных значений, сопровождаемые затоплением отдельных участков побережья озера.

Пропуск паводков (расход) через гидроузел зависит, в первую очередь, от уровня воды и притока в оз. Байкал, а также от паводковых расходов на Иркуте и других притоках Ангары в нижнем бьефе Иркутской ГЭС [6–9]. За все время эксплуатации Иркутской ГЭС максимальный зафиксированный среднесуточный расход воды через гидроузел составил 4180 м³/с (1973 г.), продолжался всего одни сутки и принес значительные ущербы на территории г. Иркутска. В настоящее время затопление территорий в нижнем бьефе происходит уже при расходах через Иркутскую ГЭС в объеме 2800 м³/с.

В многоводные годы в случае превышения уровня оз. Байкал на отметке нормального подпорного уровня (НПУ) 457,00 м ТО, в соответствии с действующими Правилами использования водных ресурсов (ПИВР) [8] и постановлением Правительства РФ № 234 [10], допускается максимальный сброс воды через Иркутскую ГЭС в объеме до 6000 м³/с (с учетом расходов р. Иркут), что может привести к катастрофическим затоплениям территорий ее нижнего бьефа, сопровождаемых миллиардными ущербами.

В данной статье представлены результаты выполненных исследований по моделированию границ зон затоплений для участка нижнего бьефа «плотина Иркутской ГЭС – устье р. Белой» и оценке потенциальных ущербов при пропуске повышенных расходов через Иркутскую ГЭС, которые возможны в многоводные годы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования стали участки в нижнем бьефе Иркутской ГЭС (ИГЭС). Они находятся на нерегулируемом участке р. Ангары от плотины ИГЭС до сопряжения с Братским водохранилищем. В зависимости от расхода Ангары и ее притоков, а также уровня Братского водохранилища, длина участка может меняться от 80 до 125 км. В границы данной территории попадают города Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское, Свирск, д. Буреть, с. Олонки, р.п. Тельма, поселки Железнодорожный, Усть-Балей, д. Усть-Куда, поселок станции Батарейная и др. с общей численностью населения около 1 млн чел., а также промышленные предприятия и объекты инфраструктуры (рис. 1).

При исследовании территории нижнего бьефа, в зависимости от формы рельефа и русла р. Ангары, были выделены следующие ключевые участки: г. Иркутск (плотина ИГЭС – Глазковский мост – пос. Жилкино – пос. Боково) – г. Ангарск (пос. Мегет – о. Грановский, протока Еловая – о. Большой – устье р. Китой) – р.п. Тельма – г. Усолье-Сибирское (о. Красный – о. Большой) – устье р. Белой – г. Свирск.

Более детально были рассмотрены территории населенных пунктов, дачных поселков, участков дорог, производственных и социальных объектов, попадающих под затопление, составлен их реестр при различных уровнях воды и расходах ИГЭС, выполнены оценки потенциальных ущербов.

Модели рельефа в нижнем бьефе Иркутской ГЭС. При использовании разработанных в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН) программных средств автоматического формирования морфостворов и моделирования течения при заданных расходах ИГЭС были определены уровни р. Ангары на заданных створах с формированием множества производных показателей, построены береговые линии и отмечены зоны затопления.

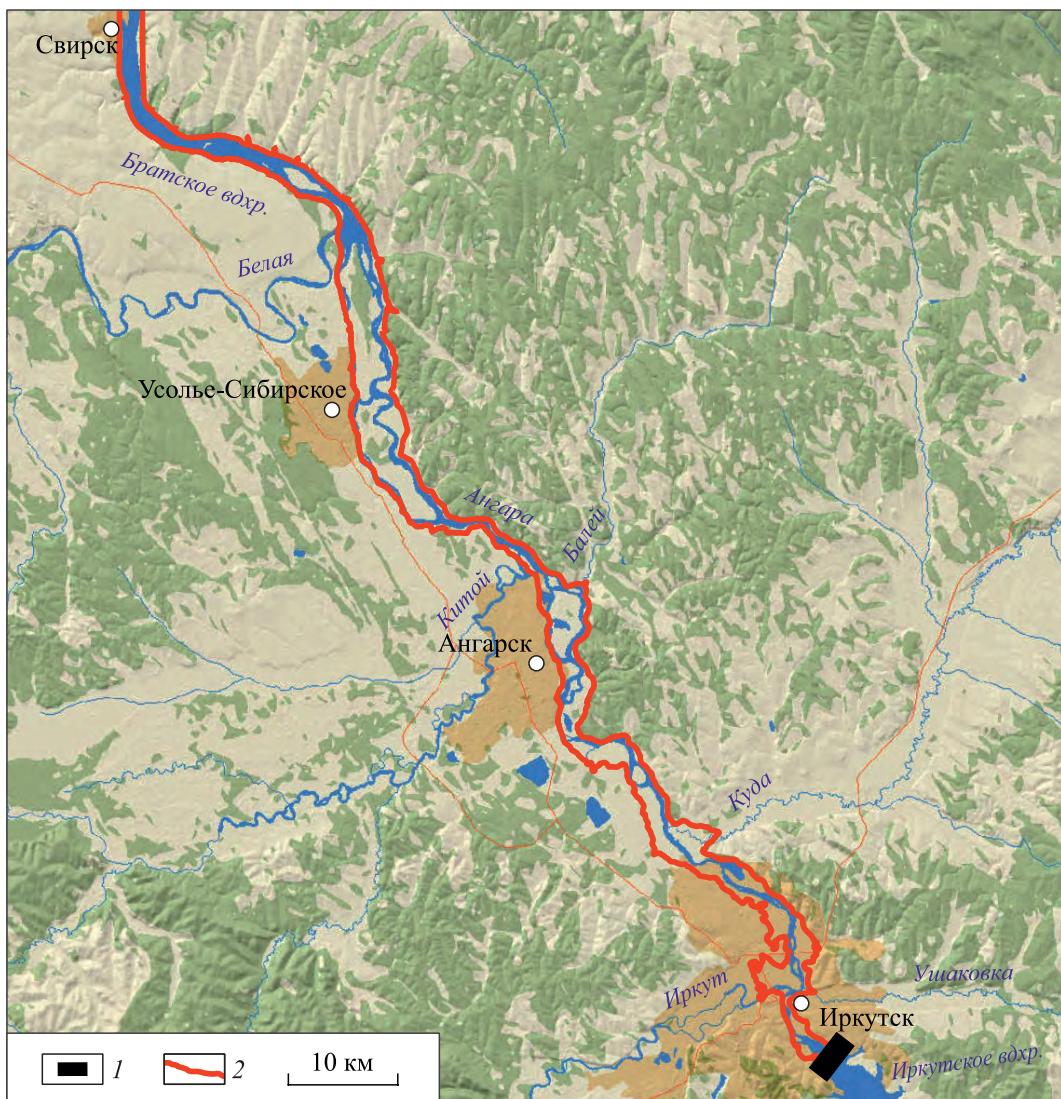


Рис. 1. Границы нижнего бьефа Иркутской ГЭС.

1 — Иркутская ГЭС; 2 — границы потенциального затопления нижнего бьефа.

Для моделирования зон затопления в нижнем бьефе ИСЭМ СО РАН совместно с Институтом динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН) разработана цифровая модель рельефа, включающая надводную и подводную части р. Ангары [11–13]. Для создания комбинированных моделей рельефа (объединенный наземный рельеф с прибрежной подводной частью) были использованы различные источники информации: изолинии рельефа с векторной топоосновой масштабов 1:25 000 и 1:50 000; отметки глубин и изобаты, оцифрованные с лоцманских карт водохранилища и нижнего бьефа, результаты промеров глубин с помощью эхолота. Для уточнения цифровых моделей ключевых участков также использовались новейшие данные лидарной съемки и съемки при помощи БПЛА, полученные в 2020–2022 гг. Результаты проведения сканирования и аэрофотосъемки на ключевых участках рельефа были представлены в виде отдельной НИР с описанием методики, границ съемки и использованием соответствующих аппаратных средств¹. Такие ис-

¹ Отчет о выполнении НИР «Предоставление архивных данных воздушного цифрового лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки ключевых участков для обеспечения дополнительными данными и формирования рельефа мелководных зон и прибрежных территорий оз. Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС». — Иркутск: КадастрСъемка, Изд-во Ин-та динамики систем и теории управления СО РАН, 2022. — 197 с.

следования необходимо проводить регулярно в связи с изменением русловых процессов в условиях повышенных антропогенных нагрузок р. Ангары и ее притоков [14, 15].

Для представления модели рельефа использовалась триангуляционная сеть. Для работы с ней применялась разработанная в ИДСТУ СО РАН библиотека для построения и обработки триангуляций Делоне с ограничениями [16]. Для повышения качества моделей рельефа были применены алгоритмы обработки триангуляций, использующие современные ГИС (QGIS, GlobalMapper и др.).

В результате выполнения комплексных работ получен набор совмещенных 3D-моделей рельефа для ряда водных объектов и их участков, разработана комплексная модель совмещенного рельефа на участке от ИГЭС в г. Иркутске до впадения в Ангару р. Белой (вблизи г. Свирска).

Модель течения р. Ангары. На основе описанной выше уточненной модели рельефа был проведен расчет зон затопления в нижнем бьефе ИГЭС при различных расходах через ее створ. Для этого использовалась гидравлическая модель установившегося течения р. Ангары [17, 18] в виде задания большого количества базовых морфостворов, находящихся на заданном расстоянии друг от друга (20–50 м) и отражающих основные разветвления и соединения рукавов реки. На основе заданных морфостворов были сформированы контуры их поперечных сечений в виде зависимости высоты от расстояния до крайней точки левого берега морфоствора.

Для определения средней скорости потока при установившемся течении используется формула Шези

$$V = C \cdot \sqrt{RI}, \quad (1)$$

где V — средняя скорость потока воды; C — коэффициент сопротивления трения по длине реки (коэффициент Шези); R — гидравлический радиус; I — наклон водной поверхности.

Коэффициент сопротивления C определяется по формуле Павловского

$$C = R^y / n_i, \quad y=1/6, \quad i=\overline{1, N}, \quad (2)$$

где n_i — шероховатость i -го участка сечения.

Расчет геометрических характеристик каждого морфоствора для установившегося режима производился по формулам

$$\begin{aligned} P &= \sum_{(i)} l_i, \quad S = \sum_{(i)} s_i, \quad B = \sum_{(i)} b_i, \\ l_i &= \sqrt{h_i^2 + b_i^2}, \quad s_i = (h_{i-1} + h_i) \cdot b_i / 2, \quad i = \overline{1, N}, \\ R &= S/P, \quad Q = VS, \quad K = CS \cdot \sqrt{R}, \end{aligned} \quad (3)$$

где P — смоченный периметр; S — площадь сечения; B — ширина реки; Q — расход воды; K — расходная характеристика; h_i , b_i , l_i , s_i — глубина, ширина, длина, площадь i -го участка сечения соответственно.

Методом итераций для малого изменения уровня реки по установленным расходам через ИГЭС проведены расчеты указанных показателей с задаваемой ошибкой. Для каждого расхода выполнен расчет морфометрических характеристик всех заданных морфостворов, уровень воды в которых определяется на основе средней скорости потока. После итерационных процедур уточнения уровня в каждом морфостворе определяются их характеристики. Далее определяются параметры промежуточных морфостворов с равномерным по длине изменением уровня водной поверхности и проверкой гидравлических показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Площади затопления. На основе уточненной модели рельефа проведено моделирование прохождения расходов через ИГЭС в диапазоне от 2800 до 6000 м³/с, предусмотренных техническим проектом гидроузла [7] и действующими ПИВР [8], с шагом увеличения расхода 400 м³/с и учетом возможных повышенных боковых притоков Ангары (реки Иркут, Китой, Белая) в нижнем бьефе — в границах от плотины ИГЭС до устья р. Белой. Результаты моделирования показали, что в современных условиях затопления в нижнем бьефе наблюдаются уже при расходах ИГЭС 2800 м³/с (3200 м³/с с учетом расхода Иркута), причем основная часть возможных затоплений приходится на г. Иркутск. Данный расход является проектным при полной загрузке турбин и относится к нормальным режимам



Рис. 2. Подтопление о. Елизовский (а) и о. Конный (б) в августе 2008 г.
(расход Иркутской ГЭС 2800 м³/с).

ИГЭС в период ее эксплуатации. При этом полностью обеспечить незатопляемость территории г. Иркутска в многоводные годы не представляется возможным. Речь может идти только о минимизации ущербов с учетом допустимых критических объемов расходов и достигнутых уровней озера.

Для верификации результатов были использованы фактические данные космоснимков (например, снимки группы спутников Sentinel) за период 2008–2023 гг., когда расход воды ИГЭС менялся в диапазоне от 2800 до 3600 м³/с, а также оперативная информация о водохозяйственной обстановке (Росводресурсы, МЧС). В качестве примера на рис. 2 представлены фотографии последствий затопления о. Елизовский и о. Конный (Юность) в августе 2008 г. при расходах ИГЭС 2800 м³/с.

Для определения зон затопления при расходах через ИГЭС 3600 м³/с (4000 м³/с с учетом расхода Иркута) и выше использовались расчетные изолинии уровней р. Ангары, полученные на основе разработанных цифровых моделей рельефа и течения. Результаты площадей затопления и число объектов, попадающих под затопление при различных расходах ИГЭС (с учетом Иркута), представлены в табл. 1.

Для г. Иркутска можно выделить следующие зоны риска при расходе в нижнем бьефе ИГЭС от 4000 до 4400 м³/с: о. Елизовский, о. Юность, о. Конный, спортивный комплекс «Поляна», Верхняя и Лисихинская набережные, территория в устье Иркута (о. Комсомольский, п-ов Кировский), мкр. Кирова, территория рынка «Китай-город», СНТ в устье р. Топки, микрорайоны Жилкино и Боково.

С учетом проведенных в последние годы работ по укреплению берега, при расходах в нижнем бьефе ИГЭС до 4500 м³/с по результатам моделирования затоплению не подвержены такие объекты, как ТЦ «Яркомолл», ТЦ «Леруа Мерлен», ЖК Затон. Полученные оценки не всегда совпадают с результатами других организаций. Так, по данным инженерно-геодезических изысканий, проведенных в 2021 г. по заказу Министерства природных ресурсов и экологии Иркутской области (Исполнитель — ООО «Национальный земельный фонд», г. Омск), названные объекты будут иметь высокий уровень подтоплений, поэтому для них необходимо выполнить уточняющие дополнительные исследования.

Таблица 1
Сводные показатели площади затопления
и число объектов, попадающих под затопление
при различных расходах в нижнем бьефе

Расход в нижнем бьефе, м ³ /с	Площадь затопления, км ²	Число объектов, попадающих под затопление, тыс.
4000	36	3,9
4400	49	6,6
4800	59	6,8
5200	68	8,4
5600	82	9,7
6000	98	15,6

Наиболее подвержен затоплению при повышенных расходах участок территории г. Иркутска в устье Иркута (рис. 3), затрагивающий большое количество объектов жилой, социальной и промышленной застройки, дорог, подземных коммуникаций.

В целом, площадь затопления по нижнему бьефу при расходах 4000 м³/с составляет более 36 км², при расходах 4400 м³/с — 49 км², при максимально допустимых расходах 6000 м³/с площадь затопления достигает 98 км².

Необходимо отметить, что расход боковых притоков Ангары, особенно р. Иркут, может существенно повлиять на общий расход воды в нижнем бьефе. В действующих ПИВР [8] и Методических указаниях [19, 20] при назначении режимов (расходов) ИГЭС учет расхода Иркута обя-

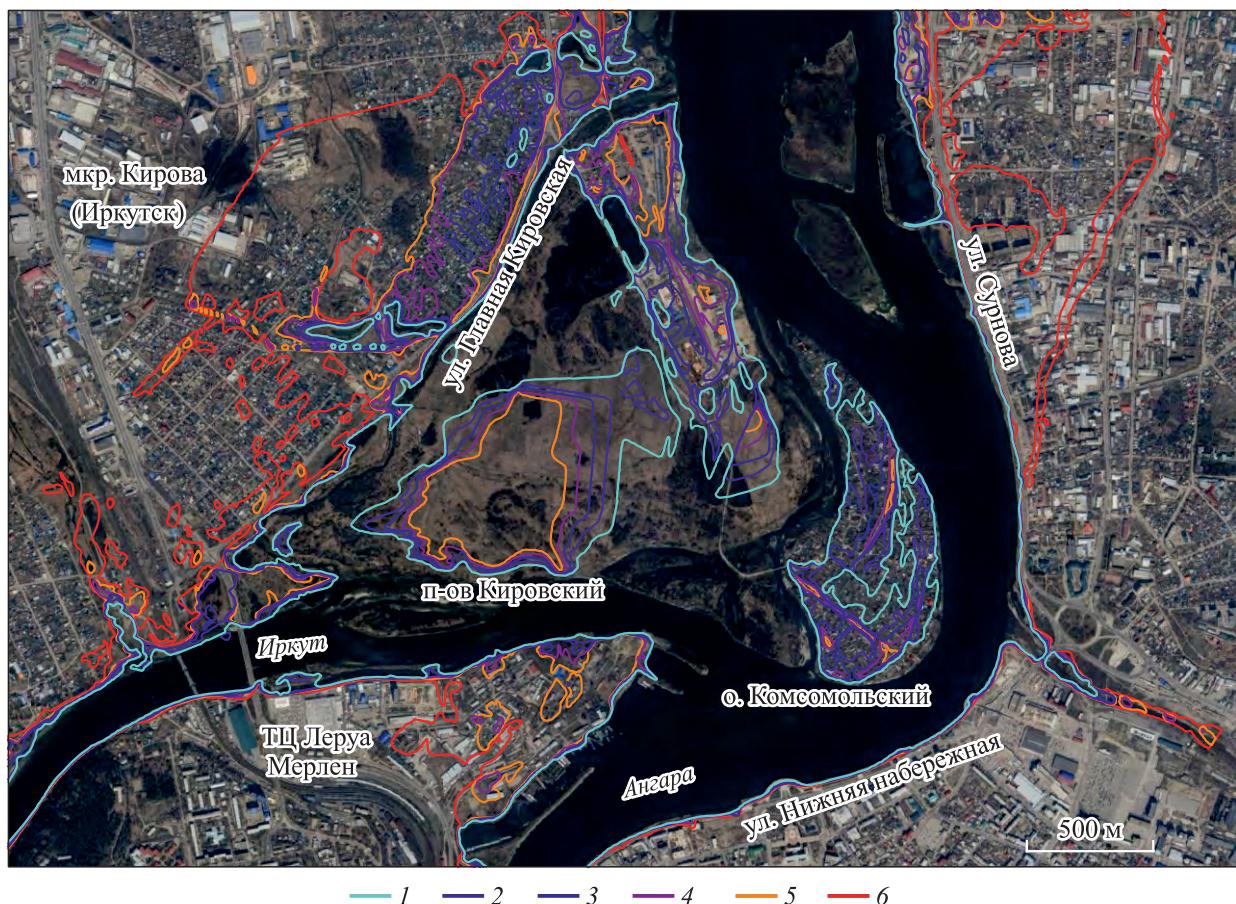


Рис. 3. Уровни затопления г. Иркутска (устье р. Иркут) при различных сценариях расхода воды через Иркутскую ГЭС.

Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$: 1 — 4000; 2 — 4400; 3 — 4800; 4 — 5200; 5 — 5600; 6 — 6000.

затоплен. Повышенные расходы Иркута в основном наблюдаются в третьем квартале. При многолетнем среднегодовом расходе Иркута 120 $\text{м}^3/\text{с}$ среднемноголетний расход третьего квартала составляет около 300 $\text{м}^3/\text{с}$, а максимальные паводковые декадные, среднесуточные и срочные (часовые) расходы Иркута сопоставимы с максимальными расходами ИГЭС (до 1800—5700 $\text{м}^3/\text{с}$ соответственно). Особенno опасна ситуация совпадения во времени паводка на Иркуте с высокой водностью на оз. Байкал в период высоких отметок озера и повышенных расходов ИГЭС, как это происходило в 1971 и 1973 гг.

Ущербы от затопления. На основании рассчитанных площадей объектов и протяженности инженерных коммуникаций, попадающих в зоны затопления, при пропуске расходов через ИГЭС в диапазоне 2800—6000 $\text{м}^3/\text{с}$ были определены потенциальные ущербы, соответствующие принятому расходу. При расчете ущербов использовалась «Методика оценки вероятностного ущерба от вредного воздействия вод и оценки эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий» ВИЭМС, 2006 г. [21].

Поскольку назначение расхода ИГЭС, в соответствии с ПИВР, зависит от уровня оз. Байкал, полученные оценки ущерба в нижнем бьефе в зависимости от расхода должны быть сопоставлены с оценками ущерба в верхнем бьефе, соответствующего достигнутому уровню озера.

По результатам исследований, выполненных в рамках НИР по регулированию уровня оз. Байкал², при повышении уровня оз. Байкал с отметки 457,00 до отметки 457,10 м ТО потенциальные ущербы

² Отчет о выполнении НИР «Влияние изменения уровня воды в озере Байкал на состояние экосистемы озера, определение ущерба объектам экономики и инфраструктуры прибрежной территории Республики Бурятия, Иркутской области в зависимости от уровней озера и сбросов Иркутской ГЭС» (шифр научной темы FWEW-2021-0009). Сводный заключительный отчет 2 этапа. — Иркутск: Изд-во Ин-та динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, 2022. — 641 с.

Таблица 2

Социально-экономический ущерб и оценка потерь природных ресурсов в зависимости от расходов в нижнем бьефе Иркутской ГЭС, млн руб.

Показатель	Расход в нижнем бьефе ИГЭС, м ³ /с					
	4000	4400	4800	5200	5600	6000
Социально-экономический ущерб при затоплении объектов	2920	5668	6609	9127	12 120	27 144
Стоимостная оценка ущерба хозяйственным объектам	402	1046	1743	2779	4388	11 864
Объекты транспорта, включая дороги, причалы, лодочные станции и земли отвода ж/д	49	603	937	1379	1601	2263
Объекты промышленности	113	117	154	190	738	2390
Иные производственные объекты, включая ведомственные	160	220	521	1067	1885	6815
Стоимостная оценка ущерба социальным объектам и домохозяйствам	2513	4617	4860	6341	7726	15 272
Жилые здания и домохозяйства, включая приусадебные участки	2474	4549	4743	6140	7382	12 574
Жилые здания и иные постройки	1937	3748	3814	5089	6226	11 078
Приусадебные участки	536	801	929	1051	1156	1496
Социально-экономический ущерб и оценка потерь природных ресурсов	2924	5739	6683	9203	12 198	27 226

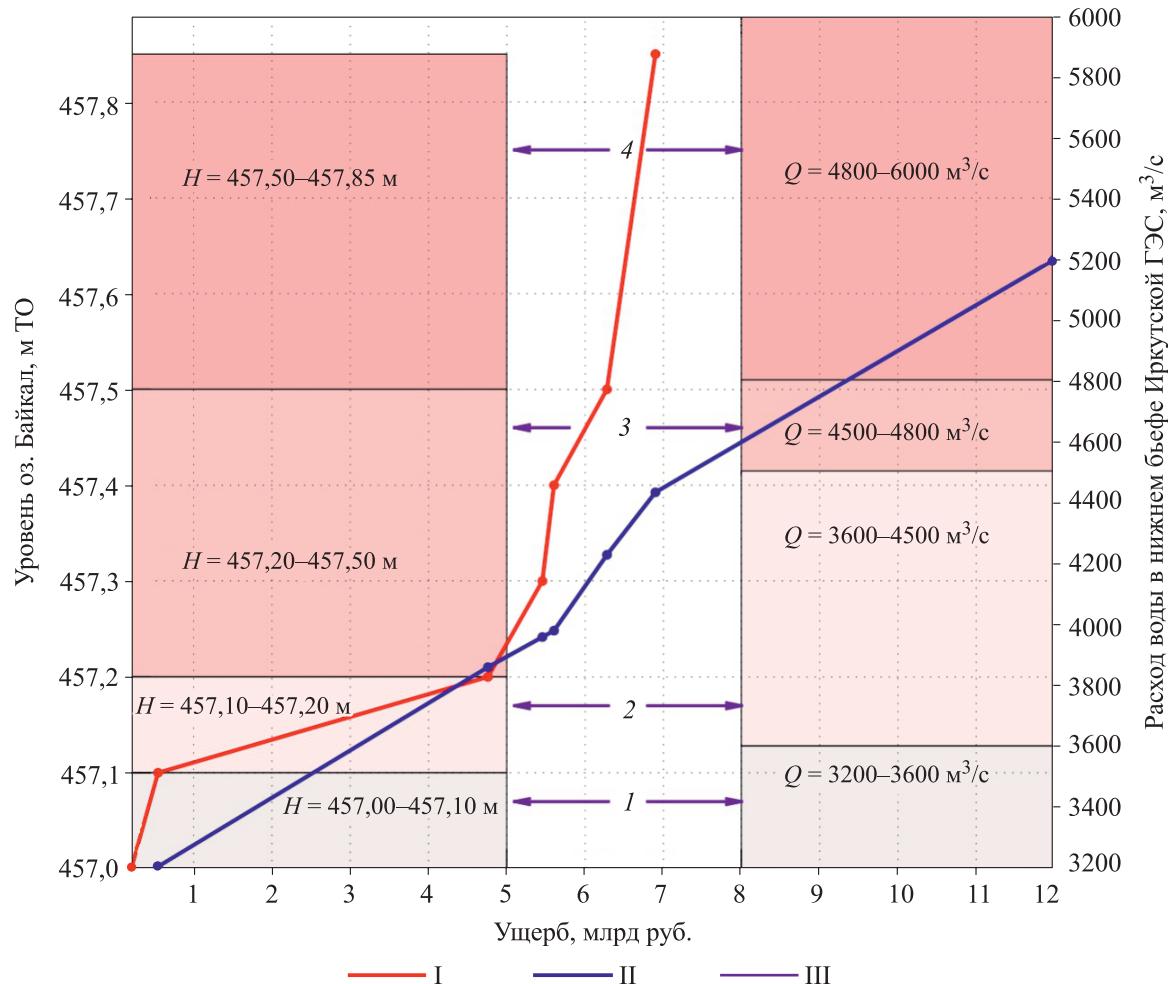


Рис. 4. Зависимость ущербов в верхнем и нижнем бьефах от уровня оз. Байкал и расхода Иркутской ГЭС.

Зависимость ущербов: I — от повышенного уровня; II — от повышенного расхода, III — сопоставление ущербов при повышении уровня оз. Байкал и расхода воды в нижний бьеф, где I — уровень 457,00–457,10 м и расход 3200–3600 м³/с, 2 — уровень 457,10–457,20 м и расход 3600–4500 м³/с, 3 — уровень 457,20–457,50 м и расход 4500–4800 м³/с, 4 — уровень 457,50–457,85 м и расход 4800–6000 м³/с.

будут относительно невысокие — 0,5 млрд руб. При повышении уровня от 457,10 до 457,20 м ТО ущербы увеличатся на порядок — до 4,8 млрд руб. Дальнейшее повышение уровня до отметок 457,30; 457,40; 457,50; 457,85 м ТО сопровождается плавным ростом ущербов — до 5,5; 5,6; 6,5; 6,9 млрд руб. соответственно.

В нижнем бьефе значительный рост ущербов начинается с расходов 3600–4000 м³/с (включая расход р. Иркут) с увеличением ущербов от 0,3 до 2,9 млрд руб. При расходе 4400 м³/с (включая расход р. Иркут) ущерб составит 5,7 млрд руб. При повышении расхода от 4500 до 4800 м³/с ущербы в нижнем бьефе вырастут до 6–6,7 млрд руб. Дальнейшее повышение расходов до 5200, 5600, 6000 м³/с сопровождается резким ростом ущербов — до 9,2; 12,2; 27,2 млрд руб. соответственно. В табл. 2 представлены оценки по социально-экономическим ущербам и потерям природных ресурсов в целом по нижнему бьефу с детализацией по объектам и различным расходам в нижнем бьефе ИГЭС.

На рис. 4 представлены зависимости ущербов в верхнем и нижнем бьефах от уровня оз. Байкал и расходов Иркутской ГЭС. В связи с нелинейными зависимостями кривых ущербов одинаковым цветом выделены области (зоны) сопоставимых ущербов для разных уровней оз. Байкал и расходов Иркутской ГЭС. Примерно сопоставимые ущербы отмечаются при уровне оз. Байкал 457,20 м ТО и расходе в нижнем бьефе ИГЭС 4000 м³/с. При дальнейшем увеличении расхода ущербы в нижнем бьефе существенно превышают ущербы в верхнем бьефе при соответствующем росте уровня озера до отметки 457,40 м ТО. При расходе выше 4500 м³/с ущербы в нижнем бьефе уже значительно выше, чем в верхнем.

Таким образом, для верхнего бьефа критическим уровнем является отметка 457,20 м ТО, для нижнего бьефа к критическим расходам относятся расходы 4000–4500 м³/с. Данные уровни и расходы имеют обеспеченность около 2 %. Более высокие расходы и уровни возможны только в условиях экстремальной или катастрофической водности при обеспеченности менее 2 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы была разработана объединенная цифровая модель надводного и подводного рельефов для установившегося течения р. Ангары с итерационным уточнением уровней водной поверхности на множестве генерируемых морфоструктур разной структуры. Расчеты показали, что при расходах ИГЭС в нижнем бьефе в диапазоне от 3600 до 6000 м³/с в зону затопления попадают большие территории с жилыми зданиями, объектами социальной сферы, инфраструктуры, промышленными предприятиями. Для данной территории был составлен реестр затапливаемых объектов при различных расходах через ИГЭС, выполнены оценки затапливаемых площадей и потенциальных ущербов.

Наиболее высокому риску затопления подвержены прибрежные территории р. Ангары в окрестностях городов Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское. Площади затапливаемых территорий могут существенно увеличиваться при сочетании больших расходов ИГЭС с экстремальными паводками на реках Иркут, Ушаковка, Китой.

При регулировании уровенных режимов оз. Байкал следует учитывать потенциальные ущербы из-за высоких уровней озера и расходов ИГЭС. Уровень оз. Байкал 457,20 м ТО и расход в нижнем бьефе ИГЭС 4000–4500 м³/с (с учетом возможного повышения расхода р. Иркут) следует считать критическими по социально-экономическим ограничениям. Они достигаются только в годы экстремально высокой водности.

Для минимизации социально-экономических рисков в многоводные годы, с учетом сопоставления ущербов в верхнем и нижнем бьефах, необходимо не допускать превышения максимального уровня воды в оз. Байкал выше отметок 457,10–457,20 м ТО и расхода ИГЭС выше 3600–4000 м³/с, когда это позволяют складывающиеся гидрологические условия, а также вести суточный мониторинг боковых притоков р. Ангары.

Результаты выполненных исследований необходимо учитывать при назначении допустимых расходов ИГЭС при высокой водности на оз. Байкал, а также при разработке новых Правил использования водных ресурсов озера и Иркутского водохранилища.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН «Анализ и моделирование уровенного режима озера Байкал на основе различных сценариев полезного притока в озеро, расходов Иркутской ГЭС с учетом влияния на экосистему, социально-экономических рисков в нижнем и верхнем бьефах, вероятных климатических изменений» (FWEU-2021-0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бычков И.В., Никитин В.М.** Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 2022. — № 5. — С. 13–24. — DOI: 10.15372/GIPR20220502
2. **Никитин В.М., Абасов Н.В., Болгов М.В., Осипчук Е.Н.** Устойчивость водохозяйственной системы бассейна реки Ангара в различных условиях водности // География и природ. ресурсы. — 2021. — № 2. — С. 103–113. — DOI: 10.15372/GIPR20210211
3. **Nikitin V.M., Abasov N.V., Bychkov I.V., Osipchuk E.N.** Level Regime of Lake Baikal: Problems and Contradictions // Geogr. Nat. Resour. — 2019. — N 40. — P. 353–361. — DOI: 10.1134/S1875372819040073
4. **Савельев В.А.** Современные проблемы и будущее гидроэнергетики Сибири. — Новосибирск: Наука, 2000. — 199 с.
5. **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. — С. 273–295.
6. **Правила технической эксплуатации и благоустройства водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутское и озеро Байкал, Братское, Усть-Илимское)** [Электронный ресурс]. — <http://pivr.enbvu.ru> (дата обращения 01.03.2024).
7. **Иркутская Гидроэлектростанция на р. Ангаре.** Технический проект. Т. «Природные условия», ч. 2. Гидрологический очерк. — М.: Гидроэнергопроект, Московское отделение, 1951. — 215 с.
8. **Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского).** — М.: Министерство мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 1988. — 64 с.
9. **Никитин В.М.** Управление водными ресурсами Байкала и Ангара: противоречия законодательства // Энергия: экономика, техника, экология. — 2021. — № 4. — С. 49–58. — DOI: 10.7868/S0233361921040066
10. **Постановление** Правительства РФ от 26.03.2001 г. № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности» [Электронный ресурс]. — <http://gov.garant.ru/document?id=2057975> (дата обращения 01.03.2024).
11. **Абасов Н.В., Осипчук Е.Н., Никитин В.М., Бережных Т.В., Хмельнов А.Е., Гаченко А.С.** Система моделей для анализа рисков экстремальной водности на реке Ангаре // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Вып. 2. 2017 г. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2017. — С. 5–11.
12. **Гаченко А.С., Хмельнов А.Е., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.** Технология моделирования зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС при высоких расходах через ее гидростворы // Сб. тр. Всерос. конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» — Новосибирск: Изд-во Ин-та вычислительных технологий СО РАН, 2017. — С. 252–256.
13. **Хмельнов А.Е., Гаченко А.С., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.** Методы и алгоритмы создания моделей рельефа и гидрологического моделирования для оценки влияния колебаний уровня воды на прибрежные объекты и территории // Вычислительные технологии. — 2024. — Т. 29, № 3. — С. 25–37. — DOI: 10.25743/ICT.2024.29.3.003.
14. **Мазур Г.С.** Изменение характеристик р. Ангара в нижнем бьефе Иркутской ГЭС в результате техногенного воздействия // Изв. Ирк. ун-та. — 2010. — Т. 3, № 1. — С. 90–114.
15. **Мазур Г.С.** Просадка уровней в нижнем бьефе Иркутской ГЭС // Материалы науч. чтений «Солнце, Земля, вода и энергия», посвящ. 75-летию со дня рождения акад. И.П. Дружинина. — Иркутск: Изд-во Ин-та систем энергетики СО РАН, 2005. — С. 118–129.
16. **Скворцов А.В.** Триангуляция Делоне и ее применение. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2002. — 128 с.
17. **Грушевский М.С.** Волны попусков и паводков в реках. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 340 с.
18. **Железняков Г.В.** Пропускная способность русел каналов и рек. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 308 с.
19. **Методические указания по разработке Правил использования водохранилищ, утверждены приказом Минприроды России от 26.01.2011 г. № 17.** [Электронный ресурс]. — https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_113871 (дата обращения 01.03.2024).
20. **Методические указания по разработке Схем комплексного использования и охраны водных объектов, утверждены приказом Минприроды России от 04.07.2007 г. № 169 (с изменениями)** [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/902053959> (дата обращения 01.03.2024).
21. **Методика** оценки вероятностного ущерба от вредного воздействия вод и оценки эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий. — М.: Изд-во Всерос. НИИ экономики минерального сырья и недропользования, 2006. — 153 с.

Поступила в редакцию 29.03.2024

После доработки 10.04.2024

Принята к публикации 11.07.2024