

Проблема регулирования уровня озера Байкал¹

В. И. ЗОРКАЛЬЦЕВ, доктор технических наук. E-mail: vizork@mail.ru
Лимнологический институт СО РАН

А. Д. КАЛИХМАН, доктор физико-математических наук. E-mail: inba@irk.ru
Иркутский государственный университет

Т. П. КАЛИХМАН, доктор географических наук. E-mail: kalikhman@irigs.irk.ru
Институт географии СО РАН

В. Н. СИНЮКОВИЧ, кандидат географических наук. E-mail: sin@lin.irk.ru
Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

Аннотация. Рассматриваются экологические и экономические проблемы, связанные со строительством плотины Иркутской ГЭС на реке Ангаре и повышением уровня оз. Байкал. Анализируются колебания притока в озеро Байкал за многолетний период, а также стока Ангары за период до и после появления водохранилища. Рассматриваются существующие механизмы регулирования многолетних и сезонных колебаний уровня озера. Предлагается концепция регулирования уровня Байкала за счет использования технологии управления режимами работы Иркутской ГЭС, направленной на поддержание оптимальной для экосистемы Байкала динамики его уровня.

Ключевые слова: озеро Байкал; река Ангара; каскад ангарских ГЭС; режимы работы ГЭС; изменения уровня Байкала; колебания притока

Введение

Активное развитие Восточной Сибири во второй половине XX века связано с реализацией программы создания Ангаро-Енисейского каскада ГЭС. С их строительством в Красноярском крае и Иркутской области появились новые транспортные магистрали, мощные предприятия по заготовке и переработке леса, другие энергоемкие производства, вокруг которых выросли города и поселки, ставшие основой активного промышленного развития Приангарья.

Кроме позитивных эффектов от эксплуатации ГЭС на Енисее и Ангаре с течением времени стали проявляться и исходно не принятые во внимание негативные последствия. К ним относятся эколого-экономические проблемы, вызванные повышением и изменениями режимов внутригодовых и многолетних

¹ Исследования выполнены в рамках госзадания Лимнологического института СО РАН (темы: 0279–2021–0003, 0279–2021–0004).

колебаний уровня Байкала. До сооружения Иркутской ГЭС изменения уровня озера определялись влиянием природных процессов – выпадением осадков, фильтрацией влаги через почву, влагонакоплением, а также испарением с открытой поверхности акватории озера и естественным стоком байкальской воды через реку Ангару. После строительства ГЭС Байкал стал частью Иркутского водохранилища, произошли общее повышение и изменение многолетних и сезонных колебаний его уровня, в которых решающую роль стали играть управляемые режимы пропусков воды через ГЭС.

Режимы пропусков воды на Иркутской ГЭС, регламентируемые правилами использования водных ресурсов (ПИВР), изначально ориентировались на интересы Иркутскэнерго и Объединенной энергосистемы (ОЭС) Сибири. Для них Байкал представлял собой не более чем крупное водохранилище для выработки электроэнергии, регулирования сезонных и многолетних колебаний электропотребления². Только как эпизодические и неизбежные ограничения учитывались нужды других потребителей воды Ангары: речного транспорта, промышленных и коммунально-бытовых водозаборов, рыбоводства. С принятием нового Водного кодекса РФ (1996 г.) стал возможен учет «на равных» требований всех участников ангарского водохозяйственного комплекса.

Еще через три года был принят закон «Об охране озера Байкал» (1999 г.). До его появления при регулировании стока через Иркутскую ГЭС практически никак не учитывалось влияние изменений уровня Байкала на байкальскую экосистему. С одной стороны, до недавнего времени фактору экологии почти не уделялось внимание в экономической деятельности не только в нашей стране. С другой – появился масштабный объем исследований (по числу тем, финансированию, материальной базе) происходящих процессов, направленных на учет интересов экосистемы озера. Одной из небесспорных попыток действий в этом направлении можно считать

² Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского). М.: Изд-во Министерства мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 1988. 65 с.

Постановление Правительства РФ 2001 г. № 234³, ограничившее допустимые колебания уровня Байкала метровым диапазоном (вдвое меньше, чем в действующих ПИВР).

Сооружение Иркутской ГЭС стало серьезным технологическим достижением нашей страны. Вслед за Иркутской, как известно, были построены намного более мощные и технически сложные Братская и Усть-Илимская станции. Сравнительно недавно на Ангаре появилась Богучанская ГЭС. На фоне этих и созданных ГЭС на Енисее, а также крупных угольных электростанций в Красноярском крае и Иркутской области, удельный вес Иркутской ГЭС и ее роль в регулировании электрических режимов существенно уменьшились. В сложившихся условиях вполне обоснованной представляется постановка задачи о трансформации режимов регулирования работы Иркутской ГЭС с энергетического на преимущественно экологический.

В данной статье в порядке обсуждения рассматривается идея дальнейшего использования Иркутской ГЭС прежде всего для целей формирования наиболее благоприятной для байкальской экосистемы и прибрежной территории динамики уровня озера. При этом производство электроэнергии на Иркутской ГЭС предлагается рассматривать как важный, но не основной продукт. Для решения технологических задач электроэнергетики Сибири и России предлагается использовать остальные ГЭС на Ангаре и Енисее.

Постановка проблемы

Можно выделить три методических подхода в управлении режимами работы ГЭС. Два из них реализуются в практике Енисейского бассейна.

1. Управление передается специальной уполномоченной организации. В настоящее время таковой является Ангаро-Енисейское бассейновое управление, решения которого стали основным механизмом в изменениях режимов работы Иркутской ГЭС. Этот подход обладает такими преимуществами, как возможность учета нестандартных ситуаций, использование накопленных знаний и опыта квалифицированных специалистов.

³ О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности: Постановление Правительства РФ от 26 марта 2001 г. № 234 // Собрание законодательства РФ. 2001. № 14. Ст. 1366.

Недостатки – инерционность, запаздывание по чисто организационным причинам в принятии решений, субъективизм и отсутствие (необязательность) формализованного (доказательного) обоснования принятых решений.

2. Выработка решений на основе предварительно составленных диспетчерских графиков, которые задают области использования разных режимов работы ГЭС, определяемых в зависимости от требований водопользователей, в конкретные месяцы года и при разных уровнях водохранилища. Диспетчерские графики ныне являются единственными документами, регламентирующими взаимоотношения сторон, зависящих от режимов работы ГЭС [Савельев, 2000]. Их недостаток – невозможность охватить широкий спектр вариантов, учет небольшого числа факторов при выборе режима и отсутствие обоснования оптимальности выбора.

3. Управление на основе экономико-математических моделей. Предварительные расчеты на таких моделях могли бы стать методической базой и для разработки диспетчерских графиков, и для строгого обоснования принимаемых компетентными органами оперативных решений в тех или иных ситуациях. На наш взгляд, разработка таких экономико-математических моделей – наиболее эффективный способ системного описания ограничений, целей и проблем управления режимами Иркутской ГЭС и уровня Байкала. К настоящему времени предпринималось несколько попыток создания таких моделей для оптимизации управления Иркутской ГЭС и всем каскадом ангарских ГЭС. Однако до сих пор в построении такой модели остается много нерешенных проблем.

Очевидно, что это должна быть динамическая экономико-математическая модель многоэтапного принятия решений с учетом известных неравномерностей и вероятностно задаваемых прогнозов поступления воды в Байкал. Построение модели полезно для упорядочивания имеющихся представлений, выявления степени достоверности располагаемых знаний о физических, биологических и социально-экономических процессах, происходящих при изменении уровня Байкала. Это должно способствовать развитию исследований проблем, порождаемых колебаниями уровня озера.

Одна из сложнейших задач при создании такой модели – формирование критерия для сравнения и выбора оптимального варианта решения. Проблема управления режимами Иркутской ГЭС

является многокритериальной. Имеют место конкурирующие экологические и экономические цели. Нередко первые противопоставляются вторым. При этом зачастую возникают противоречия как среди экономических, так и среди экологических целей. В частности, на необходимость учета разного влияния повышений и колебаний уровня Байкала на жизнедеятельность разных видов прибрежных организмов ученые обратили внимание еще 30 лет назад [Кожова, Павлов, 1995].

Байкал нередко становился местом «перетягивания канатов» сторонниками тех или иных подходов, в борьбе разных мнений, нацеленных на, казалось бы, общую задачу – улучшение эколого-экономической ситуации. Нередко оптимальный выбор по одному из критериев не является таковым по другим критериям. На наш взгляд, единственный способ выработать приемлемый компромисс в таких условиях – агрегирование разнонаправленных целей с какими-то их весами (в экономике для взвешивания благ и ущербов от экономических решений, как правило, используется денежное их выражение). Тогда проблема переносится в задачу выбора и интерпретации весов у разных целей.

Нетрудно доказать, что оптимальное для линейной свертки (суммирование с весами) критериев решение многокритериальной задачи будет Парето-оптимальным решением.

Правила регулирования режимов работы Иркутской ГЭС и уровня Байкала неоднократно пересматривались за 60 лет работы ГЭС. В этих пересмотрах можно увидеть изменения приоритетов, тех самых весов целевых функций. Каждая ревизия знаменовала «победу» той или иной точки зрения. Одной из них был введенный в 2001 г. запрет на изменение уровня Байкала больше метрового диапазона. Колебания уровня Байкала особенно сильно затрагивают интересы жителей восточного бурятского побережья озера (подтопления подвалов, погребов домов, земельных и лесных участков, дельт рек). За несколько лет средней и малой водности появилось много новых зданий, обрабатываемых земельных наделов на низменных участках, подтопляемых только в редкие многоводные года.

В то же время после ввода Иркутской ГЭС на берегах Ангары в черте Иркутска и его окрестностях резко сократился диапазон возможных изменений водотока. Что, как считают некоторые

эксперты, не позволяет обеспечить метровый диапазон регулирования Байкала.

Формально Иркутская ГЭС допускает (в том числе за счет холостого сброса) диапазон стока от 6 до 1,5 тыс. м³/с. Реально верхняя граница недостижима, поскольку есть ограничение не более 6 тыс. м³/с в Ангаре после левого притока реки Иркут. Более того, в Иркутске построены на островах и берегу новые дома, узаконенные в 1990-е, которые затапливаются при пропусках ГЭС даже в 3,5 тыс. м³/с. Таким образом, 3,5 тыс. м³ – это реальная верхняя граница в настоящее время. Для расширения диапазона регулирования требуется снести построенные дома и сооружения, подсобные и дачные участки. Все необходимые действия как на побережье озера Байкал, так и на берегу реки Ангары подлежат экономической оценке. Объем требуемых мероприятий и их достаточность должны оцениваться на основе имитационных расчетов на математической модели регулирования режимов работы Иркутской ГЭС и уровня Байкала.

Неравномерности и цели регулирования стока озера Байкал

Байкал – уникальная природная лаборатория, представляющая собой огромную ценность для науки и общества, для экологического туризма, отдыха и оздоровления. Все большей популярностью пользуются зимние туры на Байкал у жителей Юго-Восточной Азии. Внутри и вокруг озера сформировалась неповторимая экологическая система, в которой большая часть организмов являются эндемиками. Все эти особенности и достопримечательности Байкала описаны во множестве научных и художественных произведений, доказывающих необходимость сохранения в первозданном виде озера и его окружения.

Особую ценность имеет байкальская вода. Ежегодно из озера вытекает примерно 60 км³ чистой пресной воды, или в среднем более 20 л/сут. на одного жителя планеты из ныне живущих 7,7 млрд чел. И это составляет лишь одну четырехсотую часть запасов воды Байкала.

Уникальным природным объектом является и река Ангара, вытекающая из озера. Ее длина 1840 км. При слиянии с Енисеем сток Ангары превышает 120 км³ в год, в то время как годовой сток Енисея в этой точке составляет около 100 км³. Фактически

это позволяет рассматривать Ангару не как приток Енисея, а как главный водоток. Падение Ангары от Байкала до Енисея составляет 378 м, что при указанных объемах стока соответствует энергетическому потенциалу реки около 80 млрд кВт·ч/год. Из них примерно 70% реализуется на действующих ангарских ГЭС. Причем имеют место разного рода неравномерности во времени поступлений, объема запасов и использования гидроресурсов реки Ангары, которые необходимо учитывать при регулировании работы каскада ангарских ГЭС.

Возможности гидропользования на ангарском каскаде зависят главным образом от объемов притока речных вод в водохранилища. В Байкал впадает более 300 больших и малых рек, дающих до 90% прихода воды в водоем. За время нормальной эксплуатации Иркутского водохранилища (1962–2020 гг.) средний объем годового притока в озеро составил 63,5 км³, при максимальном значении 92,2 км³ (1973 г.) и минимальном – 44,4 км³ (1979 г.). Сток байкальских рек формируется на площади 540 000 км². Две трети от общего поступления вод приходится на самые крупные реки – Селенгу, Верхнюю Ангару и Баргузин.

В расходной части водного баланса Байкала преобладает сток через реку Ангару (73–86%). Самый большой сток из озера отмечен в 1985 г. (77,4 км³/год), а самый низкий – в 1982 г. (40,5 км³/год). Осадки и испарение имеют близкие, примерно компенсирующие друг друга значения (таблица).

Среднегодовой баланс ангарских водохранилищ

Водохранилище	Объем водохранилища, км ³	Основные элементы водного баланса, км ³ /год			
		приток (в том числе боковой)	осадки	сток	испарение
Иркутское (оз. Байкал)	23615	62,4 (62,4)	12,5	58,9	14,7
Братское	169,3	91,3(32,8)	1,62	91,0	1,94
Усть-Илимское	58,9	100,4 (6,8)	0,76	100,6	0,60
Богучанское	58,2	106,8 (5,9)	0,82	106,9	0,73

Источник. Рассчитано авторами на основе данных Росгидромета.

Для остальных водохранилищ каскада роль притока и стока в водном балансе водоемов еще более значима (для Богучанского водохранилища достигает 99%), а участие осадков и испарения

значительно ниже, чем для Байкала, что объясняется меньшими размерами их водной поверхности.

Характер многолетних колебаний притока в озеро Байкал с начала XX в. (рис. 1) свидетельствует о сравнительно невысокой его изменчивости и наличии разнонаправленных трендов [Синюкович, Чернышов, 2019].



Источник. [Синюкович, Чернышов, 2019].

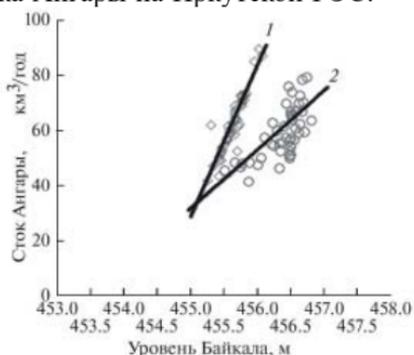
Рис. 1. Динамика многолетних колебаний притока в озеро Байкал в 1900–1920 гг.

Минимальное значение притока за всю историю наблюдений ($32,2 \text{ км}^3$) приходится на 1902 г., а после строительства Иркутской ГЭС низкий приток наблюдался в 1976–1981 гг. и 2014–2017 гг. Снижение притока в эти два периода было не столь значительным, и основная проблема регулирования стока из озера была связана с тем, что маловодье продолжалось в течение нескольких лет подряд.

Можно отметить, что средний приток в озеро после его зарегулирования несколько увеличился (на $5 \text{ км}^3/\text{год}$), а многолетняя изменчивость, наоборот, снизилась. Колебания притока при сравнении двух частей ряда относительно 1971 г. заметно изменяют характер межгодовых вариаций притока в сторону большей нестабильности и проявления короткопериодных колебаний [Синюкович, Чернышов, 2019].

Внутригодовые изменения притока отличаются крайней неравномерностью. Большая часть годового объема притока приходится на теплое время года, тогда как в период зимней межени (ноябрь–март) поступление речных вод в среднем составляет только 10%. При этом в январе–марте месячные объемы притока обычно не превышают 1 км^3 .

Создание Иркутской ГЭС, естественно, отразилось на зависимости стока Ангары от уровня воды в Байкале. После заполнения водохранилища (с 1959 г.) сток стал зависеть от режима эксплуатации ГЭС. В работе А.В. Фролова и Т.Ю. Выручалкиной [Фролов, Выручалкина, 2017] представлен приведенный на рисунке 2 график, где видно, что в период естественного режима (до 1958 г.) между интенсивностью стока и среднегодовым уровнем Байкала имеет место почти функциональная зависимость. После зарегулирования сток Ангары уже нельзя рассматривать как однозначную функцию от уровня воды в Байкале. Значительную роль в соотношении «уровень Байкала – сток» стало играть управление режимами водотока на Ангарской ГЭС. Для зарегулированного периода разброс точек по сторонам аппроксимирующей прямой 2 больше, чем для прямой 1, и явные отклонения от линейной зависимости прямо связываются с регулированием стока Ангары на Иркутской ГЭС.



Источник. [Фролов, Выручалкина, 2017].

Примечание. Линии – линейные аппроксимации, ромбы и кружки – данные наблюдений

Рис. 2. Зависимости стока р. Ангары от уровня воды в оз. Байкал в 1901–2014 гг.:

1 – для периода 1901–1958гг.; 2 – для периода 1959–2014 гг.

Ангарские ГЭС выполняют ряд важных функций. Прежде всего их можно рассматривать как источник производства больших объемов дешевой электроэнергии. На трех ГЭС в Иркутской области (Иркутской, Братской, Усть-Илимской) вырабатывается в среднем 48,5 млрд кВт·ч электроэнергии в год, что составляет 80% выработки Иркутской электроэнергетической системы (ЭЭС), которая является одной из крупнейших в мире. Объемы производства электроэнергии в ней соответствуют производству и потреблению некоторых развитых стран. В совокупной выработке на иркутских ГЭС основной объем электроэнергии приходится на Братскую (в среднемноголетних объемах 46,4%) и Усть-Илимскую ГЭС (45,2%). Доля Иркутской ГЭС относительно невелика (8,4%) из-за более низкого напора (31 м против 100 и 90 м) и меньшего расхода воды (1920 против 2910 и 3160 м³/с в среднем).

Вырабатываемая на ангаро-енисейских ГЭС половина электроэнергии ОЭС Сибири позволила создать энергоемкие производства, такие как Иркутский и Братский алюминиевые заводы, составляющие единые технологические комплексы с Иркутской и Братской ГЭС.

В связи с произошедшими в 1990-х годах трансформациями собственности в электроэнергетике все более актуальной становится задача введения научно обоснованных рентных платежей за гидроэнергию. По предварительным оценкам, рентный доход от электроэнергии, производимой на трех ангарских ГЭС в Иркутской области должен составлять не менее 2 млрд долл. в год, а учитывая выработку электроэнергии на Богучанской ГЭС, – не менее 2,5 млрд долл. [Зоркальцев и др., 2018]. Это величина «сверхдоходности» ГЭС от использования чисто природного ресурса, принадлежащего всем гражданам России. Основная часть этих рентных доходов формируется за счет вод Байкала. На Иркутской ГЭС практически 100% электроэнергии вырабатывается с использованием вытекающей из Байкала воды. На остальных действующих ГЭС Ангары – более 60%. Это означает, что Байкал только за счет производимой из его вод электроэнергии уже давно окупает все понесенные и необходимые затраты на решение его эколого-экономических проблем.

ГЭС Ангары и Енисея выполняют также системные энергетические задачи. В их число входят: регулирование неравномерных

недельных и суточных колебаний электрических нагрузок, а также частично сезонных колебаний нагрузок – накопление воды в своих водохранилищах летом для расходования в зимний период. Они представляют собой оперативный резерв мощности для обеспечения надежности электроснабжения страны, выполняя важную функцию регулирования частоты электроэнергетической системы России.

Ангарские ГЭС служат также целям регулирования гидрологических режимов реки Ангары, уровня Байкала и водохранилищ для нужд водного транспорта, водоснабжения и мелиорации, а также для различных разовых потребностей (например, борьба с зазорами, локальными наводнениями). Нередко они участвуют в решении разовых социально-экономических проблем, в том числе по преодолению ситуаций маловодья и наводнений на отдельных участках и притоках Ангары.

Каскад ангарских ГЭС, конечно, должен рассматриваться как единый водохозяйственный комплекс с единой технологией и общими режимами регулирования его функционирования. Обсуждаемое здесь регулирование работы Иркутской ГЭС с целью создания максимально благоприятных условий для экосистемы Байкала в последующем потребует корректировки в направлении учета режимов работы нижнего бьефа, влияния на динамику накопления и срабатывания запасов воды в водохранилища Братской и нижележащих ГЭС Ангары.

Проблемы, порожденные изменениями уровня Байкала

После ввода в действие Иркутской ГЭС среднее повышение уровня Байкала над естественным среднегодовым уровнем составило около 80 см. При этом за счет частых форсировок на 10–15% возросла амплитуда регулярных сезонных колебаний и изменилась форма сезонной волны. Если раньше минимальные уровни Байкала наблюдались в апреле, то после ввода ГЭС – в основном в мае. Максимальные уровни в естественных условиях достигались в сентябре, а после зарегулирования – в октябре. Увеличился диапазон межгодовых колебаний уровня [Синюкович, 2005]. Отметим некоторые выявившиеся социально-экологические последствия для Байкала, связанные с Иркутской ГЭС.

Затопление прибрежной территории. Ангарстрой выполнил все согласованные с властями Иркутской области и Республики Бурятия мероприятия, связанные с подъемом уровня озера Байкал и Ангары от истока до плотины ГЭС. Было переселено свыше 80 населенных пунктов, в которых проживало более 5 тыс. человек. Можно отметить, что в результате сооружения Иркутской ГЭС было затоплено 45–60 тыс. га, что составляет примерно 1,5–2% площади Байкала [Гидроэнергетика, 1999]. Был нанесен существенный урон сельскому и лесному хозяйствам. Из оборота выведено 28 тыс. га сельскохозяйственных земель и 10 тыс. га лесных угодий. Сильно пострадали озерно-соровые водные системы площадью 28,5 тыс. га, игравшие важную роль в экосистеме озера. Общее повышение уровня Байкала привело к поступлениям в него большого количества органики, к изменениям гидробиологических процессов в мелководной части озера [Гидроэнергетика ..., 1999].

Эрозия берегов. Особенно заметны процессы эрозии берегов были на этапах первоначального заполнения водохранилища и поднятия уровня Байкала (1957–1959 гг.) и в первые годы искусственного зарегулирования озера [Динамика..., 1976]. В этот период (1960–1975 гг.) отмечались повышенный приток и высокий уровень воды в Байкале. По некоторым оценкам, к 1975 г. в результате разрушения берегов в него поступило около 50 млн т песка и гравия. В этот период сформировались новые относительно стабильные прибрежные условия, отмели, пляжи [Козырева и др., 2020].

Ограничения по экстремальным расходам воды через Иркутскую ГЭС. Максимальный расход воды через Иркутский гидроузел по проекту и в действующих ПИВР составляет 6000 м³/с, однако из-за бесконтрольной застройки пойменной части Ангары в нижнем бьефе ГЭС затопление и подтопление здесь происходит уже при расходах воды 2800–3000 м³/с [Никитин и др., 2019]. Площадь затопления в нижнем бьефе при расходах 3000 м³/с составляет 2728 га, а при 6000 м³/с увеличивается до 12620 га. При этом угроза и масштабы затопления существенно возрастают при прохождении паводков на реке Иркут, впадающей в Ангару в пределах г. Иркутска.

Нижний предел расходов воды через Иркутскую ГЭС в действующих ПИВР составляет 1300 м³/с (во время ледостава –

до 1250 м³/с), что продиктовано требованиями безопасной работы водозаборов, обеспечивающих водо- и теплоснабжение расположенных ниже по течению городов (Ангарск, Усолье-Сибирское, Черемхово). Отметим, что по проекту Иркутской ГЭС минимальный расход воды составлял 1050 м³/с, однако в последующем он был пересмотрен из-за углубления русла Ангары для судоходства. В навигационный период (май-октябрь) минимальный расход воды реки Ангары должен быть не ниже 1500 м³/с, хотя по факту этот предел уже составляет 1600–1700 м³/с.

Влияние на прибрежную экосистему. В 1960–1975 гг. произошли существенные негативные изменения фито- и зоопланктона в прибрежно-соровой полосе. Почти наполовину сократилась площадь нерестилищ бычков желтокрылки [Коряков, 1972]. С произошедшими в этот период изменениями уровня Байкала и режимов функционирования устьев впадающих в него нерестовых рек (и действием ряда других факторов) ученые связывают сокращение численности и биомассы омуля, снижение его уловов в конце 1960-х годов, что привело к введению моратория на вылов омуля в 1967–1977 гг. [Рыбы..., 2007].

В последующем периоде маловодья и пониженных уровней Байкала (1976–1982 гг.) отмечалось восстановление некоторых параметров экосистемы озера, в частности численности прибрежных бычков [Коряков, 1972].

На флору и фауну глубоководной части Байкала изменения его уровня почти не оказывали непосредственного влияния. Но опосредованно, через изменения прибрежной экосистемы, происходили перемены и в пелагиали озера. Например, ухудшение питания в прибрежной зоне молоди омуля могло быть одной из причин наблюдаемого снижения среднего веса омуля более чем в два раза в пелагиали [Волерман, Конторин, 1983; Смирнов, 1983].

Ущерб экосистеме Байкала наносило не только повышение уровня озера, но и его колебания. Для жизнедеятельности многих видов водных растений и зоопланктона, прибрежных бычков важна стабильность уровней в весенне-летние периоды, которая не всегда соблюдалась при назначении режимов работы Иркутской ГЭС.

Мы привели только некоторые эколого-экономические последствия изменений уровня Байкала в результате строительства

Иркутской ГЭС. Эти и другие эффекты нуждаются в комплексном изучении. Одним из результатов этих исследований должна стать выработка научно обоснованных представлений о рациональной динамике уровня Байкала в течение года. При этом также желательно получение оценок последствий отклонений в динамике уровня озера от оптимального режима. Такие данные могли бы служить информационной основой для построения штрафных функций в модели оптимизации динамики уровня с учетом объективно существующей неопределенности объемов притока в озеро Байкал на краткосрочную перспективу.

Предложения по регулированию уровня озера Байкал

Необходимость установления экологических требований к режиму регулирования уровня Байкала была определена в законе «Об охране озера Байкал». Впервые официально требования были сформулированы при обосновании проекта вышеупомянутого Постановления № 234⁴, однако они были подготовлены без проведения специальных исследований и по сегодняшний день остаются спорными [Никитин и др., 2015; Гармаев, Цыдыпов, 2019]. В связи с этим предложения по изменению режима регулирования уровня озера продолжают выдвигаться различными специалистами и, в принципе, сводятся к двум вариантам: возвращение к естественным колебаниям уровня или приближение к ним высоты и сезонного хода зарегулированных уровней. В первом случае сток воды через Иркутскую ГЭС должен назначаться соответствующим расходу воды в истоке Ангары при наблюдаемом в это время уровне Байкала [Молотов, 1997]. При этом для обеспечения стока из озера, в соответствии с пропускной способностью истока Ангары, уровень Иркутского водохранилища должен быть понижен до 454 м тихоокеанской отметки уровней. Данный вариант регулирования сопровождается снижением выработки электроэнергии на Иркутской ГЭС из-за уменьшения напора, а также постепенным снижением уровня Байкала.

⁴ Обоснование проекта Постановления о допустимых отметках минимальных и максимальных уровней воды в озере Байкал. Ассоциация «Гидропроект». М., 2000.

Можно отметить также статью О.М. Кожовой и Б.К. Павлова [Кожова, Павлов, 1995], в которой было обосновано предложение об экологически допустимом минимальном уровне озера в период 10–30 апреля на отметке 455,7 м. В качестве развития такого подхода можно рассматривать разработку «экологического» варианта регулирования уровня при подготовке ПИВР⁵. Его авторы признали невозможность достижения режима уровней воды, при котором обеспечивался бы экологический оптимум для *всех* видов гидробионтов и околородных животных. Поэтому данный вариант регулирования учитывал, в первую очередь, условия обеспечения размножения ценных промысловых видов рыб.

Очевидно, возвращение уровня озера на отметки естественного режима (первый вариант) было оправдано в первые годы после строительства Иркутской ГЭС, когда размыв берегов еще был незначительным. В настоящее время, при сформировавшейся новой береговой линии и новых аккумулятивных формах рельефа в прибрежной зоне, к которым уже адаптировалась байкальская биота, снижение уровня озера почти на 1 м будет для нее стрессовым. Поэтому более предпочтительным является второй, так называемый экологический вариант, в котором зарегулированные уровни остаются на более высоких отметках, но максимально сохраняют внутригодовой ход естественных уровней, или соответствуют оптимальным уровням для функционирования байкальской экосистемы.

Наше предложение состоит в том, чтобы снять с Иркутской ГЭС задачи ее использования для системных энергетических целей, подчинив управление режимами ее работы исключительно задаче регулирования уровня Байкала. Это включает следующие мероприятия.

1. В целях регулирования многолетних и сезонных отклонений притока воды в Байкал необходимо корректировать объемы производства на Иркутском алюминиевом заводе. Хотя с момента строительства Иркутской ГЭС и ИркАЗ они рассматривались как единый технологический комплекс (как и алюминиевые заводы, связанные с другими ГЭС Ангаро-Енисейского каскада), возможности такой синергии в полной мере не использовались для нужд

⁵ Правила использования водных ресурсов Иркутского водохранилища и озера Байкал. Проект. М.: Изд. Моск. ун-та природообустройства, 2013. 168 с.

регулирования расхода воды в водохранилищах. В настоящее время понятие «единый технологический комплекс» означает в основном только возможность для заводов получать электроэнергию по очень низким ценам (заниженным в три раза даже по сравнению с весьма умеренными тарифами для населения и сельского хозяйства Иркутской области). Вполне естественно было бы ожидать более активного использования возможностей алюминиевых заводов для снижения электрических нагрузок в маловодные годы и, наоборот, увеличения объемов производства в многоводные периоды. В обоснование этого положения можно привести, например, такой факт: в 2021 г. объем холостых сбросов на каскаде ангарских ГЭС составил 12,5 млрд кВт·ч, что даже по действующим в Иркутской области очень низким тарифам за электроэнергию для населения и сельского хозяйства означает финансовые потери более 13 млрд руб.

2. Важно установление единых тарифов на электроэнергию на территории Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края, поскольку энергоснабжение этой территории в решающей степени обеспечивают ангарские ГЭС. Это позволило бы отчасти снизить нередко возникающие противоречия этих трех субъектов РФ, расположенных на Байкальской природной территории, по режимам энергетического использования вод Байкала.

3. Необходимо иметь четко заданную динамику оптимального уровня Байкала в различные периоды (месяцы и даже отдельные дни месяцев) года. Эта динамика должна быть определена на основе научных оценок последствий от изменений уровня для жителей, баз отдыха, производств, транспорта и пр., а также для экосистемы озера. Для реализации данного предложения требуются организация и проведение специальных исследований по влиянию изменений уровня Байкала на прибрежную хозяйственную деятельность, на эрозионные процессы, на функционирование околотовных экосистем. Необходимо также иметь выраженные в различных формах оценки последствий от отклонений на разную величину реального уровня Байкала от его оптимальных значений.

4. Требуется совершенствования система регулярных наблюдений и краткосрочного прогнозирования уровня Байкала, чтобы своевременно определять величину отклонения от нормативного

«желательного» уровня. В дальнейшем возможно использование специальных методов кратко- и среднесрочного прогнозирования (от нескольких суток до месяцев вперед) притока воды в озеро Байкал. Необходимо проведение исследований с использованием специальных математических моделей [Зоркальцев, Полковская 2020] по выделению, анализу и прогнозированию: тренда и многолетних вариаций; сезонных колебаний; случайных отклонений (законов вероятности, автокорреляций) в месячном, а лучше в подекадном или в пятидневном разрезах.

5. Нужна разработка модели управления режимами ГЭС исходя из назначенного желаемого и фактического уровней Байкала, прогнозов притока в будущем. Очевидно, она должна формироваться в виде модели многоэтапного динамического стохастического программирования [Зоркальцев, Кулагина, 1991], учитывающего лаг во времени между изменениями стока воды из озера и его уровня. Необходимость учитывать несовпадение уровней Байкала и Иркутского водохранилища и наличие «узкого места» в истоке Ангары предполагает использование специальных приемов моделирования водотока в этой точке [Епифанов, Зоркальцев, 2011]. Важно также применять вероятностное описание краткосрочных прогнозов, при которых решения для того или иного момента времени должны приниматься с учетом ожидаемых вероятных условий и возможных вариантов решений в предстоящие периоды.

Литература

Волерман И.Б., Конторин В.В. Биологические сообщества рыб и нерпы в Байкале. Новосибирск: Наука, 1983. 248 с.

Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З. Уровенный режим оз. Байкал: состояние и перспективы в новых условиях регламентации // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2019. № 1. С. 37–44.

Гидроэнергетика и состояние экосистемы озера Байкал / А.А. Атутов, Н.М. Пронин, А.К. Тулохонов и др. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. 280 с.

Динамика берегов озера Байкал при новом уровненом режиме. М.: Наука, 1976. 88 с.

Епифанов С.П., Зоркальцев В.И. Задачи потокораспределения с нефиксированными отборами // Кибернетика и системный анализ. 2011. № 1. С. 81–92.

Зоркальцев В.И., Полковская М.Н. Аддитивная и мультипликативная модели выявления тренда и сезонных колебаний: приложение мультипликативной модели к динамике цен // Управление большими системами. 2020. Вып. 86. С. 98–115.

Зоркальцев В. И., Кулагина Е. Л. Математическое моделирование процесса принятия решений в условиях неопределенности // Методы мат. программ и их приложения. Свердловск: ИММ УрО АН СССР, 1991. С. 31–35.

Зоркальцев В. И., Кузнецова А. Н., Сысоева Н. М. Экологические проблемы Байкала // ЭКО. 2018. № 4. С. 159–175. DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2018-4-159-175.

Кожова О. М., Павлов Б. К. Экологические последствия поднятия уровня Байкала в связи со строительством Иркутской ГЭС // Проблемы экологии. Т. 2. Материалы международной конференции «Чтения памяти профессора М. М. Кожова». ВО «Наука», Новосибирск, 1995. С. 145–150.

Козырева Е. А., Кадетова А. В., Рыбченко А. А., Пеллинен В. А., Светлаков А. А., Тарасова Ю. С. Типизация и современное состояние берегов озера Байкал // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 453–465.

Коряков Е. А. Пелагические бычковые Байкала. М.: Наука, 1972. 156 с.

Молотов В. С. Совершенствование гидравлического режима озера Байкал с учетом экологических требований: Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та природообустройства, 1997. 27 с.

Никитин В. М., Абасов Н. В., Бычков И. В., Осипчук Е. Н. Уровненный режим озера Байкал: проблемы и противоречия // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 74–83.

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.

Рыбы озера Байкал и его бассейна / Н. М. Пронин, А. Н. Матвеев, В. П. Самусенок и др. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2007. 284 с.

Савельев В. А. Современные проблемы и будущее гидроэнергетики Сибири. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 200 с.

Синюкович В. Н. Реконструкция естественного уровня режима оз. Байкал после строительства Иркутской ГЭС // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 70–76.

Синюкович В. Н., Чернышов М. С. Особенности многолетней изменчивости притока поверхностных вод в озеро Байкал // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 30–39.

Смирнов В. В. Ресурсы омуля и их прогноз на 1980–1985 гг. // Динамика продукции рыбы на Байкале. Новосибирск: Наука, 1983. С. 201–222.

Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 264–274.

Статья поступила 11.02.2022

Статья принята к публикации 15.07.2022

Для цитирования: *Зоркальцев В. И., Калихман А. Д., Калихман Т. П., Синюкович В. Н.* Проблема регулирования уровня озера Байкал // ЭКО. 2022. № 8. С. 24–43. DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2022-8-24-43

Summary

Zorkaltsev, V.I., *Doct. Sci. (Technique)*. E-mail: vizork@mail.ru
 Leading Researcher at the Limnological Institute of SB RAS,

Kalikhman, A.D., *Doct. Sci. (Physics)*. E-mail: inba@irk.ru
 Irkutsk State University,

Kalikhman, T.P., *Doct. Sci. (Geography)*. E-mail: kalikhman@irigs.irk.ru
 V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,

Sinyukovich, V.N., *Cand. Sci. (Geography)*. E-mail: sin@lin.irk.ru
 Limnological Institute of the SB RAS, Irkutsk

The Problem of Lake Baikal Level Regulation

Abstract. Ecological and economic problems associated with the construction of the Irkutsk hydroelectric dam on the Angara River and the increase in the level of Lake Baikal are considered. The fluctuations of the inflow into Lake Baikal over a multiyear period and the Angara river flow for the period before and after the appearance of the reservoir are analyzed. Existing mechanisms for regulating multi-year and seasonal fluctuations in the level of the lake are considered. The concept of regulation of the Baikal level by using the technology of control modes of the Irkutsk hydroelectric power station, aimed at maintaining the optimum for the Baikal ecosystem dynamics of its level is offered.

Keywords: Lake Baikal; Angara River; Angara HPPs cascade; HPP operation modes; Baikal level changes; inflow fluctuations

References

Dynamics of the shores of Lake Baikal under the new level regime. (1976). Moscow. Nauka Publ. 88 p. (In Russ.).

Epifanov, S. P., Zorkaltsev, V. I. (2011). Problems of flow distribution with unfixed selections. *Cybernetics and system analysis*. No. 1. Pp. 81–92. (In Russ.).

Frolov, A. V., Vyruchalkina, T.Yu. (2017). Dynamical-stochastic modeling of multi-year fluctuations in the level of Lake Baikal and the Angara River flow. *Water Resources*. Vol. 44. No. 3. Pp. 264–274. (In Russ.).

Garmaev, E. Zh., Tsydyпов, B. Z. (2019). The level regime of the lake. Baikal: state and prospects in the new conditions of regulation. *Bulletin of the Buryat State University. Biology, geography*. No. 1. Pp. 37–44. (In Russ.).

Hydropower and the state of the ecosystem of Lake Baikal. (1999). A.A. Atutov, N.M. Pronin, A.K. Tulokhonov, etc. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS. 280 p. (In Russ.).

Koryakov, E.A. (1972). Pelagic bulls of Baikal. Moscow. Nauka Publ. 156 p. (In Russ.).

Kozhova, O.M., Pavlov, B.K. (1995). *Ecological consequences of raising the Baikal level in connection with the construction of the Irkutsk HPS. Problems of Ecology*, Vol. 2. Materials of the international conference “Readings in memory of Professor M.M. Kozhov”. IN “Science”, Novosibirsk. Pp. 145–150. (In Russ.).

Kozyreva, E.A., Kadetova, A.V., Rybchenko, A.A., Pellinen, V.A., Svetlakov, A.A., Tarasova, Yu.S. (2020). Typification and the current state of the shores of Lake Baikal. *Water Resources*. Vol. 47. No. 4. Pp. 453–465. (In Russ.).

Molotov, V.S. (1997). *Improving the hydraulic regime of Lake Baikal taking into account environmental requirements*: Abstract. dis. Candidate of Technical Sciences. Moscow. Publishing House of Moscow. University of Environmental Management. 27 p. (In Russ.).

Nikitin, V.M., Abasov, N.V., Bychkov, I.V., Osipchuk, E.N. (2019). Level regime of Lake Baikal: problems and contradictions. *Geography and Natural Resources*. No. 4. Pp. 74–83. (In Russ.).

Nikitin, V. M., Savelyev, V. A., Berezhnykh, T. V., Abasov, N. V. (2015). Hydropower problems of Lake Baikal: past and present. *Region: Economics and Sociology*. No. 3 (87). Pp. 273–295. (In Russ.).

Prinin, N. M., Matveev, A. N., Samusenok, V. P., et al. (2007). *Fishes of Lake Baikal and its basin Ulan-Ude*: Publishing House of the Buryat Scientific Center SB RAS, 284 p. (In Russ.).

Savelyev, V. A. (2000). Modern problems and the future of hydropower in Siberia. Novosibirsk: Nauka, Siberian Publishing Company of the RAS. 200 p.

Sinyukovich, V.N. (2005). Reconstruction of the natural level of the lake Baikal regime after the construction of the Irkutsk hydroelectric power station. *Meteorology and hydrology*. No. 7. Pp. 70–76.

Sinyukovich, V.N., Chernyshov, M.S. (2019). Features of long-term variability of surface water inflow into Lake Baikal. *Meteorology and hydrology*. No. 10. Pp. 30–39.

Smirnov, V.V. (1983). Resources of cisco and their forecast for 1980-1985. *Dynamics of fish production in Baikal*. Novosibirsk. Nauka Publ. Pp. 201-222. (In Russ.).

Volerman, I. B., Kontorin, V. V. (1983). *Biological communities of fish and seals in Baikal*. Novosibirsk, Nauka Publ. 248 p. (In Russ.).

Zorkaltsev, V.I. Polkovskaya, M. N. (2020). Additive and multiplicative models of trend detection and seasonal fluctuations: application of the multiplicative model to price dynamics. *Management of large systems*. Vol. 86. Pp.98–115. (In Russ.).

Zorkaltsev, V.I., Kuznetsova, A.N., Sysoeva, N.M. (2018). Ecological problems of Baikal. *ECO*. No. 4. Pp.159–175. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2018-4-159-175.

For citation: Zorkaltsev, V.I., Kalikhman, A.D., Kalikhman, T.P., Sinyukovich, V.N. (2022). The Problem of Lake Baikal Level Regulation. *ECO*. No. 8. Pp. 24–43. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2022-8-24-43