

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Байкальский государственный университет
Лаборатория Математического моделирования

Перспективные проекты и технологии

Сборник научных трудов молодых ученых

Иркутск

Издательский дом БГУ

2026

УДК. 620.91 (925.16)

В сборнике представлены научные статьи аспирантов и магистрантов, посвященных разработке актуальных экономических и экологических проектов. Особое внимание уделено разработке и обоснованию природоохранных проектов для озера Байкал.

Для преподавателей, студентов и аспирантов заинтересованных а использовании активных форм обучения и практического использования результатов обучения. Для представителей органов власти нацеленных на разработку и внедрение эффективных для народного хозяйства проектов.

Содержание

стр.

1. Зоркальцев В.И. Предисловие.....
2. Горбачев А.В. Моделирование связи численности рыб в озере Байкал с экономическими затратами на вылов.....
3. Петров А.Ю. Тепловые насосы как альтернатива угольным котельным на побережье Байкала.....
4. Зоркальцев В.И., Донцов А. М. Моделирование процесса теплоснабжения тепловыми насосами зданий на побережье озера Байкал....
5. Николаев А. А. Важность повышения точности мониторинга уровня воды водохранилищ каскада Ангарских ГЭС.....
6. Опарин К.А. Создание системы регулярных наблюдений за природными процессами на побережье и в акватории озера Байкал.....
7. Матибарчук В. Э. Применение модели декомпозиции временного ряда для краткосрочного прогнозирования цен.....
8. Андреева А. А. Проблема выбора даты финансового года: между исторической традицией и экономической рациональностью.....
9. Авдеев А.А. Преимущества использования дирижаблей при транспортировке в Иркутской области.....

Предисловие

В сборнике представлены результаты разработки научно-прикладных проектов магистрантов и аспирантов. Одна из целей подготовленных публикаций – использование активной формы обучения, при которой студенты и аспиранты самостоятельно проводят исследования по перспективным научно-прикладным проектам, учатся устным выступлениям по объяснению и отстаиванию предлагаемых проектов на семинарах, учатся написанию научных статей. В конце некоторых статей приводятся краткие комментарии-пояснения по рассматриваемому проекту научного редактора сборника.

Основная часть этих статей связана с Байкалом. Нет нужды рассказывать об уникальности озера Байкал, проблемах сохранения Байкальской территории в том числе из-за происходящего и прогнозируемого многомиллионного «наплыва» отдыхающих на Байкале. Об этом подробно написано во многих литературных, научных и научно-популярных работах.

Очень важно, чтобы высказываемые предложения имели научное обоснование. Статьи данного сборника как раз и нацелены на обучение такому экономико-экологическому обоснованию. Материалы данного сборника можно рассматривать как результаты проводимых силами студентов и аспирантов исследований по теме «Природоохранные технологии на Байкале» основных научных направлений БГУ.

Научный редактор сборника, руководитель НИР БГУ «Природоохранные технологии на Байкале», заведующий лабораторией Математического моделирования БГУ,

д.т.н., профессор Зоркальцев В.И.

Моделирование связи численности рыб в озере Байкал с экономическими затратами на вылов

Горбачев А.В., аспирант БГУ

Аннотация. Излагается экономико-биологическая модель динамики численности омуля в озере Байкал. В модели сочетаются биологические и экономические механизмы регулирования численности омуля. Экономические механизмы регулирования вылова омуля рассматриваются как дополнение и альтернатива используемому юридическому регулированию.

Ключевые слова. Байкальский омуль. Математическое моделирование. Экономические механизмы регулирования вылова.

1. Введение

Проблема уменьшения численности Байкальского омуля не теряет актуальности и к началу 2026 года. В условиях моратория на вылов присутствует положительная динамика биомассы байкальского омуля, однако нельзя утверждать, что она сохранится после снятия ограничений на вылов рыбы, особенно, с учетом роста спроса на омуль из-за возрастания потока отдыхающих на побережье озера. В этой связи высокую актуальность приобретает прогнозирование динамики численности омуля и разработки механизмов эффективного регулирования этого процесса. Это требует создания специальных инструментов для выполнения такой работы.

Инструментом исследования динамики и прогнозирования численности байкальского омуля является математическое моделирование [1,2]. К сожалению математическое моделирование динамики биомассы байкальского омуля базируется на оценках численности популяции на основе очень неточных текущих измерений, на неполных и неточных представлениях о происходящих процессах. Совершенствование способов оценки динамики численности, возрастного состава биомассы, разных видов популяций омуля, в том числе на базе гидроакустических методов исследования является актуальным направлением осуществляемых исследований экосистемы озера Байкал. При этом актуальным является развитие математического моделирования динамики рыб, выделение и описание наиболее существенных факторов в этой динамике.

Существует множество факторов, влияющих на динамику численности рыб в озере. К ним относятся чисто биологические факторы - особенности размножения, питания, естественной смертности. Эти факторы традиционно изучаются учеными-

лимнологами [2, 3]. Другую, не менее важную для Байкала группу факторов составляют социально-экономические условия для регулирования размножения и вылова омуля.

Человеческий фактор подлежит регулированию. Одним из способов такого регулирования могут служить меры административного и уголовно-правового характера. С 1 октября 2017 года действует мораторий на вылов байкальского омуля. Полное снятие моратория на промышленный вылов байкальского омуля не ожидают раньше 2027-2030 года. Хотя популяция восстанавливается, ее запасы пока не достигли целевого уровня. При этом с 2023-2024 годов разрешен ограниченный любительский лов зимой и летом (удочками). Нарушение запрета влечет административный штраф по статье 8.37 КоАП РФ и уголовную ответственность по статье 256 УК РФ, в зависимости от объема вылова рыбы. [1, 5]

Однако, это не единственный способ борьбы с браконьерами. Вылов рыбы, доставка рыбы, получение инструментов и оборудования вылова рыбы для браконьеров сопряжены не только со временными затратами, но также и с финансовыми. Если доход от продажи рыбы не компенсирует финансовые издержки на её вылов и транспортировку, издержки связанные с незаконным выловом, то для браконьеров теряется практический смысл заниматься незаконным промыслом. Таким образом, управляя балансом спроса и предложения, возможно регулировать антропогенный фактор, влияющий на динамику рыб озера Байкал. Данная статья носит постановочный характер. Она посвящена описанию понятийного аппарата для формирования модели взаимодействия биологических и экономических факторов в динамике численности омуля озера Байкал. Статья является развитием ранее опубликованных разработок в данном направлении [1, 4, 5],

2. Описание затрат на вылов омуля

Предлагаемая математическая модель описывает связь между затратами и предельными издержками на рыбный промысел с динамикой вылова и численности байкальского омуля. Также вводится один из управляемых параметров – цена на рынке байкальского омуля, формируемая на основе соотношений спроса и предложения. В дальнейшем планируется развить рассматриваемую модель, включив в нее подмодель взаимодействия спроса и предложения на рыбу на побережье озера Байкал, механизмы регулирования равновесной цены. В качестве механизмов управления ценой рассматривается

завоз на побережье озера Байкал рыб из сопредельных территорий (Братское водохранилище, река Лена), рыбозаведение. Модель взаимодействия спроса и предложения, способы регулирования достигаемой точки равновесия спроса и предложения на омуля Байкала пока не рассматривается.

В данной статье ограничимся описанием механизмов регулирования цен омуля на побережье Байкала. Будем исходить из того, что эта цена является экзогенным, ключевым фактором в формировании текущих объемов вылова омуля. Вылов должен быть рентабельным мероприятием. То есть он может осуществляться до таких объемов, при которых цена не меньше затрат на вылов. Причем в затраты на вылов можно включать издержки, связанные с «преодолением» юридических ограничений на вылов омуля.

В рассматриваемой далее модели используются годовые данные. В том числе годовые объемы вылова, годовые издержки. В полном соответствии с экономической теорией [2], затраты на вылов рыбы можно разделить на постоянные и переменные. Полные затраты на вылов рыбы равны сумме постоянных и переменных затрат. Причем переменные и, следовательно, полные затраты зависят как от объемов вылова омуля, так и от объемов (численности) омуля в Байкале в данном году. Ниже представлена функция двух переменных представляющая зависимость полных затрат от количества выловленной рыбы и количества рыбы в озере.

$$C(Q, R) = VC(Q, R) + FC,$$

Здесь:

Q – количество рыбы в озере на начало данного года,

R – количество выловленной рыбы в данном году.

Постоянные затраты (FC) неизменны во времени. К этим затратам можно отнести покупку и оборудование технических средств лова, средств переработки рыбы. Переменные затраты $VC(Q, R)$ зависят от объема вылавливаемой рыбы в данном году и общего количества рыбы в озере. В частности сюда относятся затраты на моторное топливо, на оплату труда (на заработную плату, прибыль) работников осуществляющих поиск, лов, переработку и реализацию продукции, а также издержки по взаимодействию с правоохранительными органами и органами исполнительной власти. Считаем, что это дифференцируемая функция. Она является возрастающей от объема вылавливаемой рыбы, ее производная по аргументу R положительная. Причем эта производная возрастает с ростом переменной, затраты на вылов дополнительных объемов рыбы возрастают с увеличением абсолютной величины этих объемов.

С ростом количества рыбы в Байкале затраты на вылов одного и того же объема сокращаются. То есть производная переменных затрат по аргументу Q должна быть отрицательной. Естественно, что значения функции переменных затрат при всех реально возможных значениях аргумента должны быть положительными.

В данной статье будем считать, что функция переменных затрат является произведением двух функций $G(R)$ и $L(Q)$:

$$VC(Q, R) = G(R) L(Q), \quad (1)$$

Здесь функция $G(R)$ отражает влияние количества вылавливаемой рыбы в озере на переменные затраты. Будем рассматривать данную функцию в следующем виде:

$$G(R) = K + 0.5 B R^2, \quad (2)$$

где K и B заданные положительные коэффициенты.

Функция $L(Q)$ отражает влияние количества существующей рыбы в озере на переменные затраты. Данная функция используется в рассматриваемой здесь модели в виде линейной функции:

$$L(Q) = S - AQ, \quad (3)$$

где S и A заданные положительные коэффициенты.

Обозначим MC (Marginal Cost) – предельные издержки на вылов рыбы. Они определяются как производная переменных затрат, являющейся также и производной полных затрат, от объемов вылавливаемой рыбы:

$$MC(Q, R) = L(Q) BR. \quad (4)$$

В разрабатываемой математической модели, объемы вылавливаемой в данном году рыбы должны быть такими, чтобы предельные издержки не превышали цену рыбы. То есть должно выполняться неравенство:

$$MC \leq P, \quad (5)$$

где P – цена рыбы на рынке. Если это условие выполняется в строгой форме, то объем вылавливаемой рыбы должен увеличиваться. Если указанное неравенство не выполняется, предельные издержки превысили цену, то часть вылова рыбы становится невыгодной и объёмы вылова должны сокращаться. В рассматриваемой ниже динамической модели неравенство (5) используется в виде равенства в каждый период времени.

В рассматриваемом здесь варианте модели цена P используется как управляемый параметр. Используя данный параметр, можно оценивать

экономически целесообразные объемы отлова. В свою очередь эти объемы отлова будут сказываться на формировании объемов количества рыбы в озере Байкал. А это, как отмечалось, приведет к изменениям придельных издержек на вылов рыбы.

3. Динамическая экономико-биологическая модель

Приведем описание модификации модели динамики омуля [1] с дополнением приведенных выше зависимостей. Численность омуля в году $t+1$ определяется как численность предыдущего года с добавлением прироста за год D_t :

$$Q_{t+1} = Q_t + D_t. \quad (6)$$

Отметим, что годовой прирост численности омуля D_t может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Этот прирост задается выражением:

$$D_t = hQ_{t-s} - f(Q_t) - R_t, \quad (7)$$

где h заданный положительный коэффициент,

$$f(Q_t) = gQ_t + c(Q_t)^2 \quad (8)$$

при заданных положительных коэффициентах g, c .

Первая составляющая в правой части (7) представляет численность сеголеток омуля в году t , которое определяется пропорционально количеству половозрелых к этому времени особей, которое принимается пропорциональным численности омуля s лет назад. Здесь s – период созревания до половозрелого возраста сеголеток.

Вторая составляющая в правой части (7), определяемая функцией (8) представляет естественную смертность омуля. Она задаётся в виде квадратичной функции (8).

Третья составляющая – объем вылова омуля в году t . Этот объем задается на основе заданной цены омуля и рассмотренных в предыдущем разделе издержек. В этой составляющей состоит отличие рассматриваемой здесь модели от изложенной ранее модели [1]. Считаем, что придельные издержки должны быть в точности равны цене омуля. Тогда из (1) - (4) получаем следующее выражение объема вылова в году t от цены омуля и объема омуля в Бакале:

$$R_t = P / (BL(Q_t)). \quad (9)$$

Выражение (9) имеет вполне понятную интерпретацию. Согласно этому выражению объем вылова омуля возрастает с ростом цены на него. Объем вылова возрастает также при увеличении массы омуля в Байкале, поскольку функция $L(Q_t)$ убывающая.

Анализ научных статей показывает, что промысловая длина байкальского омуля в среднем составляет 239–294 мм, а масса рыбы варьируется от 198 до 407 г. [3]. В рамках модели будем считать, что масса каждой особи омуля будет составлять 0,4 кг.

Далее представлены примеры расчетов по рассматриваемой модели.

5. Моделирование численности байкальского омуля при различных ценах

Примем значения коэффициентов $K = 0,5$, $B = 0,15$, $S = 0,75$, $A = 1,46$. В данном разделе приведены результаты моделирования количества рыбы в стационарном состоянии при различных ценах. Стартовое количество рыбы в озере определено как 0.5 млн. особей. Стартовое значение вылова во всех случаях равно 1 млн. особей. Значение параметра цены P варьируется от (680 руб./кг до 1800 руб./кг. Для каждого рассматриваемого варианта расчетов цена принимается постоянной во времени. Результаты приведены в таблице 1. На рисунках 1 – 6 приведены графики численности омуля по годам и вылова по годам, при соответствующих ценах.

Таблица 1. Цены и количество рыбы в стационарном состоянии.

Цена, руб./кг	Количество вылова в квазистационарном состоянии, млрд.	Количество особей в популяции квазистационарном состоянии, млрд.	Средний процент вылова
680	0,009	0,37	2,69
1000	0,01	0,34	3,5
1800	0,012	0,254	5,72



Рисунок 1. Численность байкальского омуля в озере по годам, при неизменной цене на рыбу в 680 руб./кг

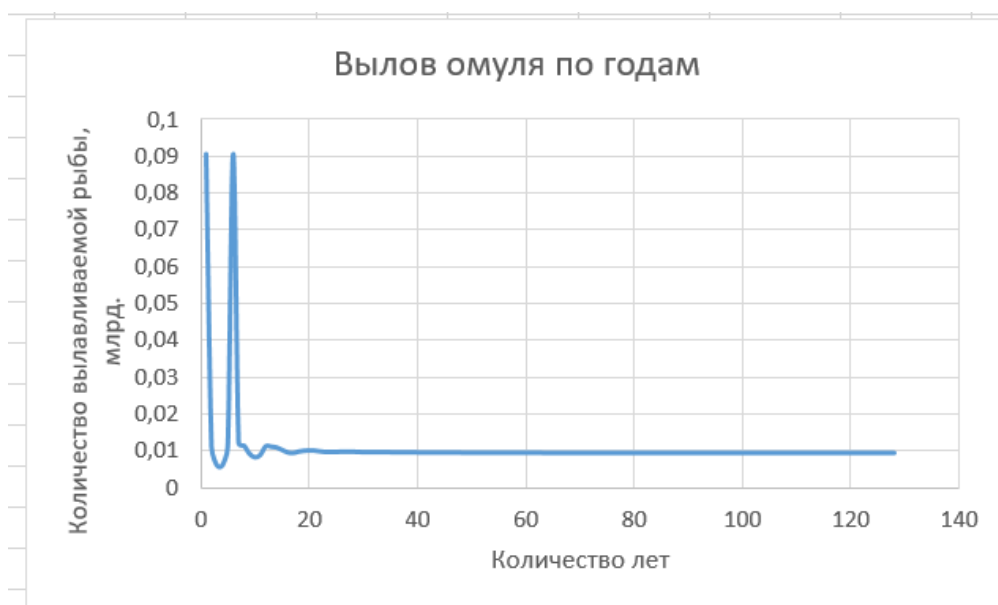


Рисунок 2. Вылов байкальского омуля в озере по годам, при неизменной цене на рыбу в 680 руб./кг



Рисунок 3. Численность байкальского омуля в озере по годам, при неизменной цене на рыбу в 1000 руб./кг

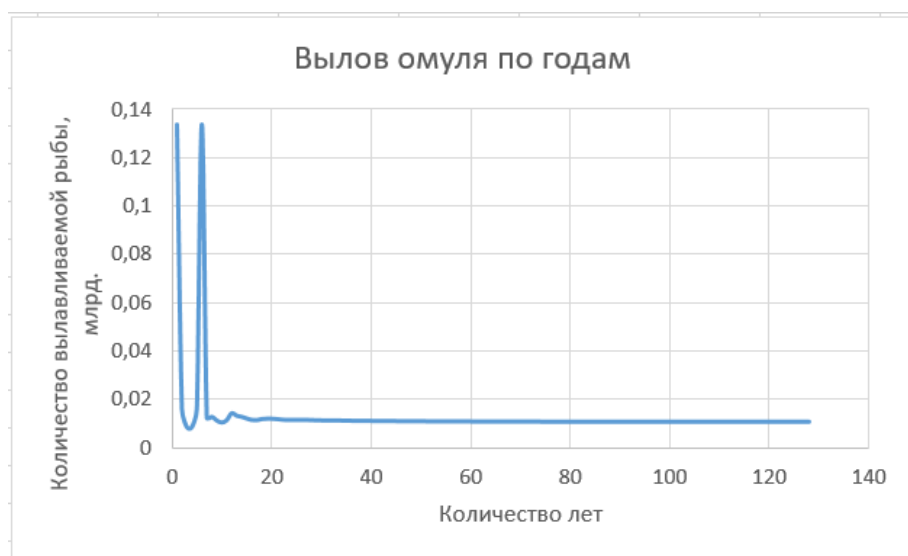


Рисунок 4. Вылов байкальского омуля в озере по годам, при неизменной цене на рыбу в 1000 руб./кг



Рисунок 5. Численность байкальского омуля в озере по годам, при неизменной цене на рыбу в 1800 руб./кг

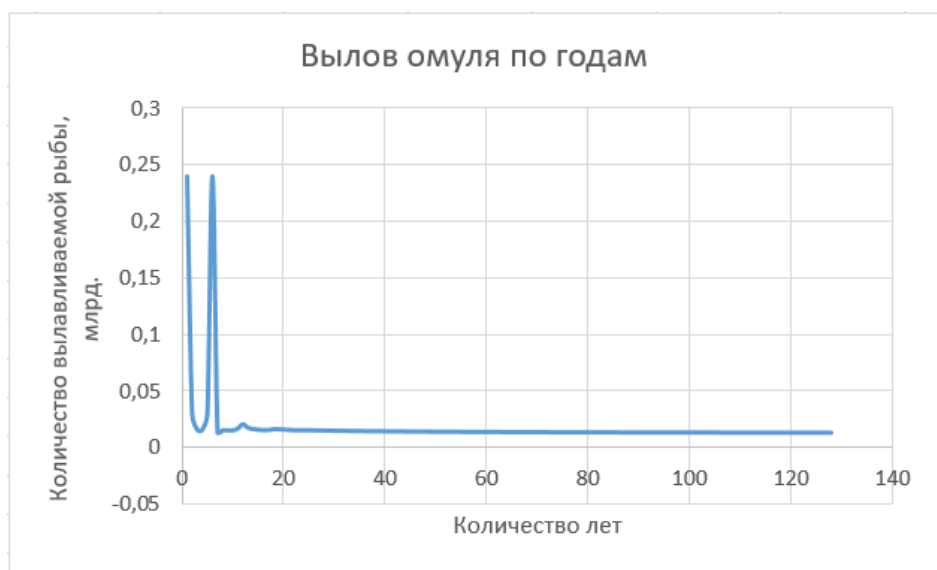


Рисунок 6. Вылов байкальского омуля в озере по годам, при неизменной цене на рыбу в 1800 руб./кг

Как видно из рисунков 1 – 6, увеличение цены приводит к уменьшению количеству особей в квазистационарном состоянии, и к увеличению временного промежутка в течении которого популяция приходит к этому состоянию. С увеличением цены растет количество выловленной рыбы в стационарном состоянии.

Замечания редактора.

Описанная выше модель и представленные результаты расчетов на ней претендуют только на попытку описания процессов динамики омуля в озере Байкал, определяемую здесь взаимодействием биологических и экономических факторов. Стартуя из нестационарного состояния объемы вылова и численности байкальского омуля совершают колебательные изменения, сходящиеся к стационарным состояниям. Интенсивность этих колебаний, амплитуда, периодичность нуждаются в более детальном рассмотрении и описании.

Из табл.1 виден нелинейный характер влияния изменения уровня цены на объемы вылавливаемого омуля и его численности в стационарном состоянии. Первоначальный рост цены на 25% повлек рост объема вылавливаемого омуля на 11%. При этом численность омуля сократилась на 4%.

Последующий рост цены на 80% (с 1000 до 1800 руб. за кг.) влечет увеличение объема вылавливаемого омуля только на 20%. При этом происходит существенное сокращение численности омуля в стационарном состоянии, на 25%. Получаемые соотношения вполне интерпретируемы. На последующих этапах исследований можно надеяться на уточнение используемых и расчетных показателей.

Планируемое добавление к изложенной модели блока описывающего рыночное равновесие, можно надеяться, позволит учитывать динамику изменения во времени цен на омуля в связи с изменениями во времени функций спроса и предложения на омуля. Например, в результате роста функции спроса из-за возрастания количества отдыхающих на Байкале, введения возможных мероприятий по снижению этой функции (например, при завозе рыбы на побережье Байкала со стороны). Происходящий прогресс в орудиях лова ведет к существенному снижению придельных затрат на лов при прочих неизменных условиях. В качестве противодействующего этому снижению механизма можно, например, рассматривать введение специальных налогов на продажу омуля. Конечно, набор возможных механизмов регулирования спроса и предложения омуля подлежит специальному обсуждению. Модель рассматриваемого здесь типа будет полезна для формирования системных представлений о возможных последствиях предлагаемых мероприятий.

Литература

1. Математическое моделирование оценки численности байкальского омуля в системе социально-экономических и правовых аспектов экологической

правонарушаемости /А.П. Суходолов, А.П. Федотов, М.М. Макаров, П.Н. Аношко, Е.В. Губий, В.И. Зоркальцев, П.Г. Сорокина, И.В. Мокрый, А.В. Лебедева. — DOI: 10.17150/2500-4255.2019.13(5).757-771 // Всероссийский криминологический журнал. — 2019. — Т. 13, № 5. — С. 757–771.

2. Канторин В.В. Математическое моделирование популяции байкальского омуля / В.В. Канторин. — Новосибирск: Наука, 1980. — 208 с.

3. Никифорова А.П. Изучение размерно-массового состава байкальского омуля (*Coregonus migratorius*) // Вестник КрасГАУ. 2022. № 5. С. 155–160. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-5-155-160.

4. Сорокина П.Г. Методы и подходы к моделированию популяции байкальского омуля / П.Г. Сорокина // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2020. — Т. 2, № 3. — С. 47–61.

5. Зоркальцев, В. И. Имитационная модель динамики численности байкальского омуля / В. И. Зоркальцев, П. Г. Сорокина // Актуальные вопросы аграрной науки. — 2021. — № 38. — С. 34-48.

Тепловые насосы как альтернатива угольным котельным на побережье Байкала

Петров А. Ю., магистрант БГУ

Аннотация. Приводятся некоторые экологические проблемы озера Байкал. Многие проблемы порождены ростом туризма и отдыха на Байкале. Особое внимание уделено задаче выбора вариантов энергоснабжения зданий на побережье озера. Представлены результаты сравнительного анализа двух вариантов теплоснабжения здания в 100 квадратных метров. Один вариант, - теплоснабжение от угольной котельной. Второй вариант, - теплоснабжение от теплового насоса на байкальской воде. Показано, что второй вариант экономически и экологически эффективнее.

Ключевые слова. Экологические проблемы Байкала. Теплоснабжение. Котельные. Тепловые насосы.

Некоторые экологические проблемы Байкала. Являясь величайшим пресноводным водоемом мира, привлекающим к себе миллионы туристов ежегодно, Байкал, к сожалению, не защищен от загрязнений и антропогенного вреда. Если набрать в строке поиска запрос «Проблемы экологии озера Байкал», то мы получим знакомый еще со времен обучения в школе набор проблем:

- *Загрязнение воды.*

Сюда входят как промышленные выбросы от производств (печально известный Байкальский Целлюлозно-бумажный комбинат), так и сточные сливы от многочисленных турбаз и домохозяйств, не прошедшие должную фильтрацию и выталкиваемые из грунта или поверх грунта прямо в воды озера, что безусловно нарушает его экологическое равновесие и угрожает здоровью живых организмов.

- *Беспорядочная туристическая деятельность.*

Инфраструктура прибрежных зон попросту не справляется с сезонным наплывом туристов, разрушающих почву и оставляющих за собой многочисленные отходы. Кроме того, использование личного автотранспорта бесспорно наносит непоправимый вред всему побережью.

- *Несанкционированные свалки.*

Проблема, вытекающая из предыдущей, она влечет за собой отравление почв и рек, в том числе микропластиком, а также просачивание токсичных соединений в подземные воды и из них в воды озера.

- *Отсутствие современных очистных сооружений.*

В большинстве населенных пунктов стоки фактически сбрасывают в грунт без какой-либо очистки и, как уже отмечено выше, постепенно

накапливаясь в грунтовых водах, часть из них выдавливается в озеро, что провоцирует активное развитие водорослей с их дальнейшим гниением.

- *Изменение климата.*

Проблема общепланетарного масштаба, характеризующаяся повышением температуры вод, изменением режима осадков и другими климатическими изменениями, что чревато миграцией и вымиранием многих видов биологических организмов.

- *Теплоснабжение зданий на побережье озера.*

Как можем заметить, экологические проблемы Байкала связаны между собой. Для их решения и сохранения уникального природного объекта в лице озера Байкал необходимо принятие срочных мер по защите и восстановлению природных ресурсов. В этом безусловно нужна поддержка как со стороны государства, так и со стороны различных фондов и крупных предприятий региона и страны.

В данной работе предлагается рассмотреть не такую очевидную по сравнению с вышеперечисленными проблему прибрежных зон озера Байкал, а именно проблему обогрева помещений в холодное время года. Традиционно в нашем регионе для данных целей применяется сжигание дров и угля, плюс некоторые домохозяйства отапливаются за счет электричества, которое в последнее время заметно подорожало.

При этом мало применяются экологически чистые способы отопления. В качестве таковых предлагается рассмотреть возможность использования тепловых насосов. Основная цель данной статьи состоит в сравнении эффективности тепловых насосов с угольными котельными.

Тепловые насосы и угольные котельные представляют собой два принципиально разных подхода к отоплению. В первом случае используются возобновляемые источники энергии, во втором – традиционные ископаемые ресурсы. В работе мы рассмотрим их особенности с различных сторон.

Технические характеристики.

Тепловой насос использует энергию из окружающей среды и преобразует его в энергию для отопления. Возможные источники тепла: воздух, вода, грунт. Соответственно существуют следующие типы тепловых насосов: воздушные, водяные, грунтовые.

COP (Coefficient of Performance) – коэффициент преобразования (производительности) теплового насоса. Он отображает соотношение между потребляемой энергией и вырабатываемым теплом. Иначе говоря, это показатель того, сколько тепла производит устройство из 1 кВт электроэнергии.

Формула расчёта:

COP/Q

$COP = Q \text{ (теплоэнергия)} - W \text{ (электроэнергия)},$

где Q – тепловая энергия, W –затраченная электроэнергия. Эта разность в результате деления на объем затраченной электроэнергии, то есть в результате расчета безразмерного показателя

$$\text{cop} = \text{COP}/Q,$$

характеризует эффективность использования электроэнергии.

Пример расчета: тепловой насос потребляет 2 кВт электроэнергии в час и вырабатывает 8 кВт тепла в час. В этом случае: $\text{COP} = 8 - 2 = 6$. Относительная эффективность использования электроэнергии составит $6/2 = 3$. Относительный коэффициент COP зависит от температуры источника тепла и температуры отопления. Так, для грунтового теплового насоса относительная величина COP может достигать 4-5 раза, для воздушного 2-3 раза.

Угольная котельная сжигает уголь для производства тепла. Её эффективность зависит от котла и качества топлива. Существуют разного типа котлов в т. ч.: прямого горения, пиролизные, длительного горения.

Коэффициент полезного действия (КПД) (составляет в среднем 85%), зависит от конструкции и качества угля. Формула расчёта КПД:

$$\eta = (Q (\text{тепло}) - Q (\text{уголь}))/Q (\text{уголь}),$$

где Q (тепло) поставляемая потребителям тепловая энергия, Q (уголь) – максимально возможная энергия, выделяемая при сжигании одного килограмма угля (теплотворная способность угля).

Температурный режим: котлы могут работать при любых температурах, но требуют регулярной очистки от золы.

Экономические показатели.

Угольные котельные:

- капитальные затраты: низкие, равны стоимости самого котла и дымохода;
- эксплуатационные расходы: высокие из-за постоянно растущей стоимости угля и необходимости регулярного обслуживания, плюс риск экологических штрафов.

Тепловые насос:

- относительно высокие капитальные затраты на закупку оборудования и его монтаж;
- эксплуатационные расходы: низкие благодаря высокой эффективности (COP обычно 3-5).

Сравнительная экономическая эффективность теплового насоса по сравнению с котельной определяется соотношением требуемых дополнительных капитальных вложений и получаемой ежегодной экономией на текущих издержках. Формула расчета:

$$\text{срок окупаемости} = \text{дополнительные капитальные затраты} / \text{экономия в год}.$$

Экологическое влияние.

Тепловые насосы:

- нулевые выбросы CO₂ и других вредных веществ в атмосферу при условии использования возобновляемой электроэнергии или электроэнергии со стороны (например, от ГЭС Иркутской электроэнергетической системы:

- экологический след: минимальный, нет грязи от угольных складов;
- отсутствие негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека.

Угольные котельные:

- выбросы CO₂ значительные, в среднем 2.5 кг CO₂ на 1 кг угля;
- экологический след высокий, включая выбросы диоксида серы (SO₂), оксидов азота (NO_x) и золы, грязь от угольных складов;
- используют невозобновляемые ископаемые ресурсы;
- имеют негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека.

Приведем **сводный расчет** для двух вариантов отопления дома площадью 100 м² в прибрежной зоне озера Байкал: **теплового насоса (схема «вода-вода»)** и **угольной котельной**. Для сравнения эффективности также возможно использовать имитационное моделирование в программах типа MATLAB.

Исходные данные и допущения для расчетов.

- Площадь помещения: $S = 100 \text{ м}^2$
- Высота потолков: $h = 2,7 \text{ м}$
- Объем помещения: $V = S \times h = 100 \times 2,7 = 270 \text{ м}^3$
- Расчетная зимняя температура снаружи (зона озера Байкал): $t_{\text{нар.}} = -25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Температура внутри: $t_{\text{внутр.}} = +22 \text{ }^\circ\text{C}$
- Разница температур: $\Delta t = t_{\text{внутр.}} - t_{\text{нар.}} = 22 - (-25) = 47 \text{ }^\circ\text{C}$
- Длительность отопительного периода (у озера Байкал): $T_{\text{от.}} = 210 \text{ дней} = 5040 \text{ ч.}$
- Коэффициент теплоизоляции здания (среднее утепление): $K_{\text{тепл.}} = 1,3$

Расчет необходимой тепловой мощности:

Используем упрощенную формулу по объему:

$$Q_{\text{треб.}} = V \times \Delta t \times K_{\text{тепл.}} \times 0,034 \text{ (кВт/м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$$

Примечание: коэффициент 0,034 является эмпирическим значением, учитывающим усредненные теплопотери здания и климатические условия. Он позволяет рассчитать требуемую тепловую мощность для отопления помещения с учетом его объема, разницы температур и коэффициента теплоизоляции.

Подставляем:

$$Q_{\text{треб.}} = 270 \times 47 \times 1,3 \times 0,034 = 560,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Итого требуемая мощность системы отопления:

$$N_{\text{треб.}} = Q_{\text{треб.}} \div T_{\text{от.}} = 560,9 \div 5040 \approx 11,12 \text{ кВт}$$

Вывод: нужна система мощностью ~11 кВт.

Расчет для теплового насоса (схема «вода-вода»):

Энергопотребление.

- Средний COP (коэффициент преобразования) для «вода-вода» при $t_{\text{ист.}} \approx +4\text{ }^{\circ}\text{C}$: $\text{COP} = 4,0$
- Электрическая мощность насоса:
 $N_{\text{эл.}} = N_{\text{треб.}} \div \text{COP} = 11,12 \div 4,0 = 2,78\text{ кВт.}$
- Энергопотребление за сезон:
 $E_{\text{сезон.}} = N_{\text{эл.}} \times T_{\text{от.}} = 2,78 \times 5040 = 14\,011,20\text{ кВт}\cdot\text{ч.}$
- Стоимость электроэнергии:
Тариф на электроэнергию (Иркутская обл., сельский) $C_{\text{эл.}} = 1,50\text{ руб./кВт}\cdot\text{ч.}$
- Годовые затраты:
 $Z_{\text{эл.}} = E_{\text{сезон.}} \times C_{\text{эл.}} = 14\,011,20 \times 1,50 = \mathbf{21\,016,80\text{ руб./сезон.}}$

Капитальные затраты для теплового насоса.

- Тепловой насос (10–12 кВт, «вода-вода»): $\text{КТН} = 500\,000\text{ руб.}$
- Бурение скважин / укладка коллектора в водоем: $\text{МТН} = 600\,000\text{ руб.}$
- Обвязка и монтаж: $\text{ОТН} = 150\,000\text{ руб.}$

Итого:

$\text{К общ. ТН} = \text{КТН} + \text{МТН} + \text{ОТН} = \mathbf{1\,250\,000\text{ руб.}}$

Расчет мощности угольной котельной.

Для дома 100 м² с высотой потолков 2,7 м и средним утеплением:

- Удельная мощность для умеренного климата: 1 кВт на 10 м²
- Требуемая мощность котла:

$$N_{\text{кот.}} = 100\text{ м}^2 \div 10\text{ м}^2/\text{кВт} = 10\text{ кВт}$$

Добавляем запас 10–20% на пиковые нагрузки:

$$N_{\text{кот., расч.}} = 10\text{ кВт} \times 1,2 = 12\text{ кВт}$$

Принимаем: $N_{\text{кот.}} = 12\text{ кВт.}$

Расчет расхода угля:

Исходные параметры

Теплотворная способность угля (каменный):

$$q_{\text{уг.}} = 7000\text{ ккал/кг} = 8,14\text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$$

(поскольку $1\text{ кВт}\cdot\text{ч} = 860\text{ ккал}$ (7000 делим на 860 и получаем $8,14$))

- КПД угольного котла: $\eta_{\text{кот.}} = 0,75$ (75 %)
- Необходимая тепловая энергия за сезон:

$$Q_{\text{сезон.}} = N_{\text{кот.}} \times T_{\text{от.}} = 12\text{ кВт} \times 5040\text{ ч} = 60\,480\text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Формула для расчета расхода угля за сезон:

$$m_{\text{уг.}} = Q_{\text{сезон.}} \div (q_{\text{уг.}} \times \eta_{\text{кот.}})$$

Подставляем:

$$m_{\text{уг.}} = 60\,480\text{ кВт}\cdot\text{ч} \div (8,14\text{ кВт}\cdot\text{ч/кг} \times 0,75) \approx 9,91$$

Итого расход угля за сезон: $\approx 9,91\text{ т.}$

Расчет стоимости угля.

- Цена угля (с доставкой, Байкал): $C_{\text{уг.}} = 8000 \text{ руб./т.}$
- Годовые затраты на топливо:
 $Z_{\text{уг.}} = m_{\text{уг.}} \times C_{\text{уг.}} = 9,91 \text{ т} \times 8000 \text{ руб./т.} = \mathbf{79\,280 \text{ руб./сезон}}$

Капитальные затраты:

- Стоимость угольной котельной (10–15 кВт, блочная):
 $K_{\text{уг.}} = 850\,000 \text{ руб.}$
- Монтаж и дымоход: $M_{\text{уг.}} = 150\,000 \text{ руб.}$
- Итого капитальные затраты:
 $K_{\text{общ., уг.}} = K_{\text{уг.}} + M_{\text{уг.}} = 850\,000 + 150\,000 = \mathbf{1\,000\,000 \text{ руб.}}$

Сравнение затрат на тепловой насос и угольную котельную:

Показатель	Тепловой насос	Угольная котельная
Капитальные затраты, руб.	1 250 000	1 000 000
Годовые эксплуатационные затраты, руб./сезон	21 016,80	79 280
Затраты за 5 лет, руб.	$1\,250\,000 + 21\,016,80 \times 5 = 1\,355\,084$	$1\,000\,000 + 79\,280 \times 5 = 1\,396\,400$
Затраты за 10 лет, руб.	$1\,250\,000 + 21\,016,80 \times 10 = 1\,460\,168$	$1\,000\,000 + 79\,280 \times 10 = 1\,792\,800$

Выводы:

- На горизонте **5 лет** тепловой насос уже дешевле угольной котельной (разница больше 40 тыс. руб.).
- На горизонте **10 лет** тепловой насос становится ощутимо выгоднее угольной котельной (экономия > 300 тыс. руб.).
- Бесспорно, не учтено разное влияние данных типов отопления на экологию. По данному аспекту абсолютно точно выигрывает тепловой насос (для информации: средние выбросы CO₂ в угольной котельной ~20 т/сезон, золы и шлака ~1,5 т/сезон, плюс они требуют утилизации).

Практические рекомендации:

Для тепловых насосов.

- Оптимальны для регионов с умеренным климатом и доступом к возобновляемой энергии.
- Рекомендуется использовать грунтовые насосы для максимальной эффективности, но возможно применение насосов типа «вода-вода» вблизи водоемов.
- Учитывается возможность интеграции с солнечными батареями.

Для угольных котельных.

- Они могут быть временным решением в районах с дешевым углем.
- Необходимо учитывать экологические штрафы и стоимость обслуживания.
- Рекомендуются переход на более экологичные альтернативы в долгосрочной перспективе [1; 3; 5].

Подробнее о физике работы тепловых насосов

Тепловой насос является устройством, реализующим обратный термодинамический цикл (обычно на основе цикла Карно), в котором тепло переносится от низкопотенциального источника (воздуха, воды, грунта с температурой +5...+15 °С) к потребителю с более высокой температурой (например, к системе отопления с температурой 40–60 °С).

Для осуществления этого «восходящего» переноса тепла затрачивается внешняя энергия (обычно электрическая), приводящая в действие компрессор. Внутри насоса циркулирует хладагент – вещество с низкой температурой кипения. В испарителе он поглощает тепло из окружающей среды и испаряется. В компрессоре пар сжимается, его температура и давление резко возрастают. В конденсаторе хладагент отдает тепло потребителю и конденсируется. После этого он проходит через дроссель, где давление и температура снижаются, и цикл повторяется.

Ключевой показатель эффективности – коэффициент преобразования (COP), равный отношению полученной тепловой энергии к затраченной работе:

$$\varphi = \frac{Q_{\text{пол}}}{L}$$

Для реальных тепловых насосов $\varphi = 3-7$, то есть на 1 кВт затраченной электроэнергии получают 3–7 кВт тепла.

Таким образом, тепловой насос не «производит» тепло, а активно транспортирует его из окружающей среды, делая возможным эффективное использование рассеянной (низкопотенциальной) тепловой энергии [2].

О возможности применения тепловых насосов вблизи озера Байкал

Зимние температуры воздуха в местности достигают -25 -35 °С, но температура воды в озере зимой у поверхности около 0 +4 °С, а на глубине — стабильно +3 +4 °С круглый год. При таких условиях наиболее подходящим видится применение теплового насоса с источником тепла из воды. При температуре воды +4 °С $COP \approx 3,6-4,0$, что в 2–3 раза эффективнее воздушных тепловых насосов при -25 °С.

Необходимо использование замкнутого промежуточного контура (например, с антифризом на основе пропиленгликоля как нетоксичного и разрешенного для водоемов). Важно, чтобы хладагент не контактировал с водой Байкала – он будет циркулировать только внутри теплового насоса, а теплообмен с озером будет происходить через кожухотрубный теплообменник с рассолом.

Полиэтиленовые трубы можно уложить на дно озера (на глубине >5 м, где нет промерзания), как плюс – нет необходимости в бурении и земляных

работах. Сама установка может быть временной или сезонной, так как трубы легко демонтируются. При сильных морозах (редко, но такое возможно) необходимо подключение дополнительного электронагревателя или дровяного котла для пиковой нагрузки.

Важными условиями с учетом принципа природоохранности территории вблизи озера Байкал являются:

- запрет на прямой забор/сброс воды из озера, для этого нужен замкнутый контур с теплообменником;
- минимальная глубина укладки труб должна быть ниже зоны промерзания льда (обычно >2 м, лучше 5-10 м);
- в качестве материала труб можно взять полиэтилен низкого давления (ПНД), устойчивый к истиранию и низким температурам;
- тепловой насос лучше брать парокомпрессионный, фреоновый (например, R134a или R410A как менее вредные для озона), с герметичными теплообменниками.

Оптимальным выбором для озера Байкал является парокомпрессионный тепловой насос типа «вода–вода» с промежуточным контуром (рассолом), использующий тепло озера через замкнутую систему полиэтиленовых труб, уложенных на дно. Так, установка теплового насоса в Байкальском музее ИНЦ СО РАН является примером применения данной технологии в прибрежной зоне озера Байкал [4].

Общие выводы и рекомендации

Угольные котельные являются привычным способом отопления в наших широтах и потому повсеместно распространены, но они также обладают значительными недостатками. Это зависимость от невозобновляемого источника энергии и постепенный рост цен на сырье, активное загрязнение воздуха выбросами, а почвы – остаточными продуктами, а с учетом того, что зона вокруг Байкала без того страдает от значительных экологических проблем, применение угля в отопительный период является крайне неблагоприятным фактором.

Что касается тепловых насосов, то они демонстрируют значительные преимущества перед угольными котельными как с точки зрения экономии в длительной перспективе, так и безусловно влияния на экологию. Учитывая достаточно высокую стоимость необходимого оборудования и его установки, было бы крайне желательно субсидирование со стороны государства, предусматривающее покрытие расходов на покупку и монтаж оборудования для домохозяйств, готовых перейти на более экологичный способ отопления. Возможно применение системы грантов, особенно, для социальных объектов таких, как школы, библиотеки, больницы. В целом, использование тепловых насосов по крайней мере наряду с традиционными формами отопления позволило бы снизить нагрузку на экологию.

Замечания редактора

Большой опыт использования тепловых для отопления зданий на побережье Байкала на основе использования энергии воды Байкала накоплен в Байкальском музее СО РАН (п. Листвянка) и в, меньшей степени, в Байкальском выставочном центре (п. Танхой). В Байкальском Музее в 90-х годах были смонтированы два тепловых насоса институтом Теплофизики СО РАН, теплоснабжение от которых позволило вывести Музей из финансового кризиса из-за использовавшейся ранее экономически очень неэффективной схемы теплоснабжения. Использование воды для отопления здания в Байкальском музее сочеталось с применением этой же воды в аквариумах. Использовались оригинальная система водозабора, пикового теплоснабжения и резервирования системы теплоснабжения здания электрическим бойлером.

Управление работой тепловых насосов и режимами теплоснабжения зданий изначально и по настоящее время осуществляется в «ручном режиме». Мною, с участием руководства Байкальского музея, других ученых-энергетиков (в т. ч. соавтора приводимой далее статьи А.М.Донцова) были разработаны предложения по использованию автоматизированного способа теплоснабжения здания музея на базе тепловых насосов, а также комплекс мероприятий по повышению эффективности системы теплоснабжения Байкальского музея, в том числе по оснащению необходимыми приборами наблюдения, учета и управления.

Разрабатывается также концепция использования системы типовых конструктивных решений по теплоснабжению от Байкальской воды зданий на побережье озера Байкал. При этом должны учитываться размеры и конструкционные особенности зданий, режимы их загрузки в течение года. Отчасти эта разработка отражена в приводимой далее статье. Были намечены предприятие в КНР и России, которые могло бы стать поставщиками необходимого оборудования разной мощности. Обоснована целесообразность создания специального предприятия для монтажа и сопровождения эксплуатации систем теплоснабжения на байкальской воде зданий на побережье озера.

Источники:

1. Лунева С.К. К вопросу применения тепловых насосов / С.К. Лунева, А.С. Чистович, И.Х. Эмиров // ТТПС. 2013. №4 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-primeneniya-teplovyyh-nasosov> (дата обращения: 10.11.2025).
2. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии для получения теплоты в системах теплоснабжения: использование с

применением тепловых насосов [Текст]: Методическая разработка для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 140104.65 Промышленная теплоэнергетика и 270109.65 Теплогазоснабжения и вентиляция. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет: сост. Г.М. Климов, Е.Н. Цой, М.Г. Климов. Ниж. Новгород: ННГАСУ, 2013. – 50 с.

3. Овсянник А.В. Оценка энергетической эффективности тепловых насосов в системах индивидуального теплоснабжения по годовому расходу условного топлива / А.В. Овсянник, Д.С. Трошев // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2012. №4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energeticheskoy-effektivnosti-teplovyyh-nasosov-v-sistemah-individualnogo-teplosnabzheniya-po-godovomu-rashodu-uslovnogo> (дата обращения: 12.11.2025).
4. Ссылка на сайт «Байкальский музей». Раздел «О музее». URL: <http://www.baikal.ru/ru/museum/index.html> (дата обращения: 10.11.2025).
5. Трубаев П.А. Тепловые насосы: учебное пособие / П.А. Трубаев, Б.М. Гришко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 143 с.

Моделирование процесса теплоснабжения тепловыми насосами зданий на побережье озера Байкал

Зоркальцев В.И., Донцов А. М., аспирант БГУ

Аннотация. Излагается методика расчета экономической эффективности теплоснабжения зданий и сооружений на побережье озера Байкал тепловыми насосами, использующими в качестве источника теплоэнергии байкальскую воду. Методика основывается на вычислении математического ожидания приведенных затрат на основе имитационного моделирования процессов теплоснабжения в течение года. В качестве критерия для сравнения вариантов предлагается использовать минимизацию математического ожидания приведенных затрат. В излагаемой методике учитываются сезонные, суточные и случайные колебания потребности в теплоэнергии в зависимости от изменений температуры наружного воздуха.

Ключевые слова. Тепловые насосы, побережье Байкала, теплоснабжение баз отдыха, приведенные затраты, температура воздуха.

1. Введение

Одной из проблем в развитии туризма и отдыха на Байкале является теплоснабжение зданий и сооружений. В силу суровых климатических условий необходимо нести большие затраты на теплоснабжение не только в зимний, но даже и в летний период. Использование для этих целей котельных и печей на угле требует для многих районов побережья озера повышенных затрат в силу удаленности от транспортных магистралей. При этом возникают большие экологические проблемы в использовании угольных котельных и печей на побережье озера. Очистка от сажи, окислов углерода, серы и от других вредных выбросов котельных и печей малой мощности технически затруднена и ведет к большому удорожанию.

В качестве потенциально эффективных по экономическим и экологическим условиям источников теплообеспечения населенных пунктов и баз отдыха на побережье озера Байкал могут рассматриваться древесина выращиваемая на специально создаваемых энергетических плантациях [1], а также, в некоторых районах побережья озера Байкал, использование природного газа. К сожалению оба эти экологически приемлемые вида топлива пока не нашли должного применения. Требуется значительное время и специальные разработки по формированию условий для этого.

В настоящее время для целей энергообеспечения баз отдыха на побережье Байкала широко используется электрообогрев. Такой способ

энергообеспечения имеет большие экологические и технологические преимущества. Его недостаток – дороговизна.

Особый интерес для теплоснабжения зданий на побережье представляют тепловые насосы [2], использующую энергию воды Байкала. Даже зимой вода подо льдом Байкал имеет положительную температуру, около 4°C. Охлаждение в тепловом насосе до 2°C, когда вода еще находится в жидком состоянии, позволяет получать около 2-х калорий с каждого литра пропускаемой через тепловой насос байкальской воды. Большой опыт использования тепловых насосов на байкальской воде накоплен в Байкальском музее. По оценкам работников музея переход на теплоснабжение сократил примерно в 6 раз затраты на теплоснабжение здания Музея. Конечно, такой колоссальный эффект был достигнут прежде всего из-за существовавшей ранее очень затратной системы теплоснабжения от котельной соседнего предприятия (санатория Байкал), работавшей на топочном мазуте. Значительного эффекта (удешевления теплоснабжения в 2-3 раза) можно было ожидать при переходе просто на электроотопление здания при существующих в иркутской области тарифах на электроэнергию. Вместе с тем, и по сравнению с электроотоплением применение тепловых насосов в Байкальском музее дает существенный эффект. По имеющимся расчетным оценкам это ведет к сокращению затрат на отопление также примерно в 2-3 раза.

Представленные оценки нуждаются в уточнении с учетом реально существующих сезонных, суточных и случайных колебаний, теплопотребления, диктующих необходимость использования переменных режимов в работе системы теплоснабжения. Для активного использования тепловых насосов на основе воды Байкала для теплоснабжения зданий необходима методика расчета их экономической эффективности. Данная статья посвящена изложению такой методики, проходящей в настоящее время численную апробацию. На основе данной методики предполагается также решение задач оптимизации состава и параметров оборудования, режимов его эксплуатации. Учет действия случайных факторов в рассматриваемой методике осуществляется организацией расчетов математического ожидания приведенных затрат при разных вариантах теплоснабжения. Математическое ожидание рассчитывается на основе многократной имитации функционирования системы теплоснабжения здания в формируемых случайным образом (методом Монте-Карло, называемого также методом статистических испытаний) изменяющихся в течение года и суток внешних условий (температуры наружного воздуха). Излагаемая здесь методика является конкретизацией для тепловых насосов методического подхода к оптимизации и оценки эффективности систем энергообеспечения потребителей на побережье озера Байкал изложенного в работах [3-6].

3. Принципиальная схема работы ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА теплового насоса

Теоретическое обоснование устройств, которые ныне называются тепловыми насосами дал в 1824 году С.Карно. Первая работающая модель этого устройства была создана в 1852 году У. Томпсоном (более известным как лорд Кельвин), который и ввел в обиход этот термин. Тепловой насос – это устройство, которое забирает теплоэнергию от низкопотенциального (низкотемпературного) источника (охлаждает поток вещества в этом источнике) и передает эту энергию потребителю с повышенной температурой [2]. Тепловой насос для отопление зданий на основе байкальской воды включает три контура (см. рис. 1) [7].

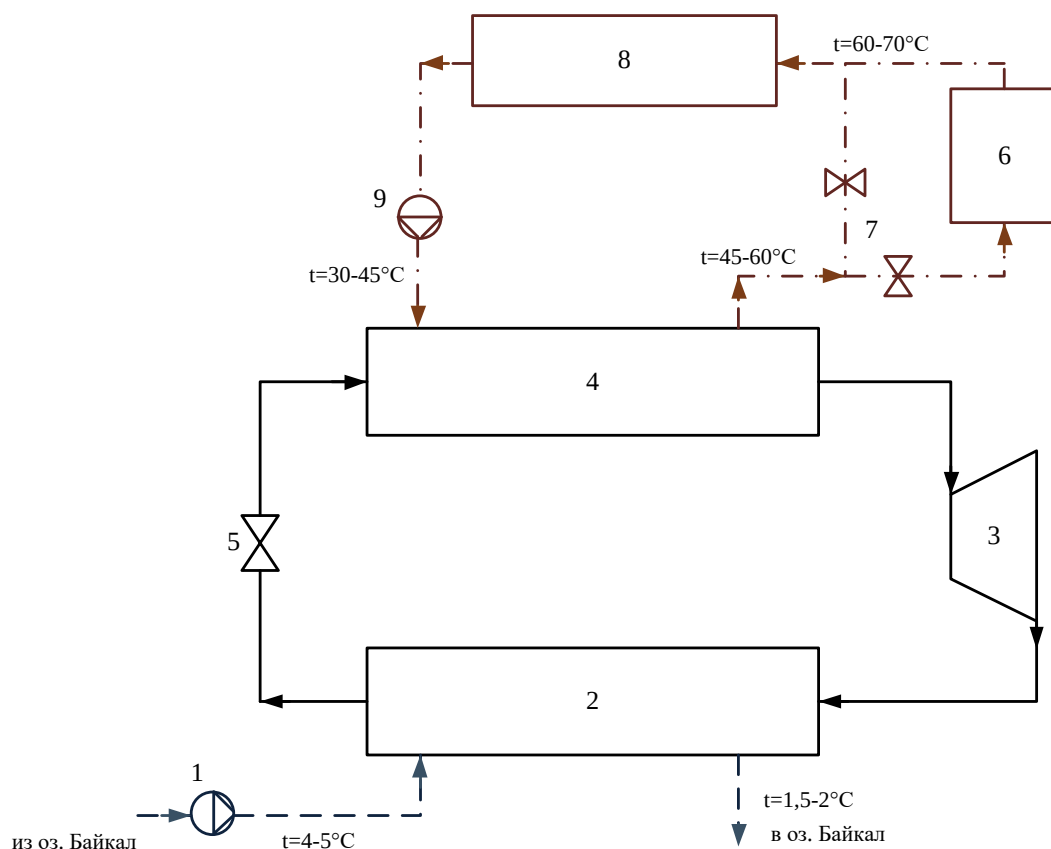


Рис. 1. Принципиальная схема системы отопления на основе теплового насоса: 1 - насосная станция; 2 - испаритель; 3 - поршневой компрессор с электроприводом; 4 - конденсатор; 5 - терморегулирующий вентиль; 6 - электродкотел; 7 - регулирующие водяные вентили; 8 - отопительные приборы; 9 - циркуляционный насос системы отопления.

Первый контур – поток вещества с низкопотенциальной энергией. В нашем случае это вода Байкала. В результате прохождения воды через теплообменник со вторым контуром ее температура понижается. Чтобы вода не замерзала, могла циркулировать ее температура после прохождения теплообменника не должна быть меньше 0°C. Для надежности, понижение температуры должно осуществляться до температуры примерно в 2° Цельсия.

Второй контур составляет собственно тепловой насос, в котором циркулирует хладагент. Этот хладагент испаряется в камере с низким давлением и низкой температурой, являющейся теплообменником с первым контуром. Здесь осуществляется передача энергии от байкальской воды к хладагенту. Затем температура хладагента повышается в результате повышения давления компрессором. После чего во втором теплообменнике осуществляется передача энергии от хладагента в третий контур в процессе конденсации. При этом может осуществляться нагрев воды в третьем контуре до 50-70°C. После теплообменника-конденсатора хладагент проходит через дроссель понижающие давление и соответственно температуру этого хладагента в целях последующего забора энергии от низкопотенциальных вод Байкала.

Третий контур – собственно система теплоснабжения здания. Нагретая в теплообменнике вода поступает в систему отопления здания, где охлаждается и опять идет на подогрев в теплообменник-конденсатор теплового насоса. При необходимости в электродотле осуществляется дополнительный подогрев сетевой воды.

Отметим, что для перекачки жидкости во всех трех контурах используются электрические двигатели. Расходуемая ими энергия, денежные затраты на нее, составляет основную часть затрат на теплоснабжение. Причем вся электроэнергия второго и третьего контура (потраченная на преодоление трения) и отчасти первого контура входит в суммарную величину энергии идущей на отопление здания.

Одним из простейших способов оценки эффективности теплового насоса является сопоставление объемов расхода электроэнергии при производстве теплоэнергии в тех же объемах только электрообогревателями (и электродотлами) и с использованием тепловых насосов. По имеющимся оценкам применение теплового насоса требует примерно в 3 раза меньше электроэнергии, что свидетельствует о потенциальной экономической эффективности такого способа теплоснабжения. Конечно, эта оценка не учитывает, что применение тепловых насосов является более капиталоемким мероприятием, эффективность которого существенно зависит от режимов теплоснабжения. Потребность в теплоэнергии изменяется по сезонам года, внутри суток. Возможны различного рода случайные отклонения, что ведет к необходимости использования переменных режимов выработки тепловыми насосами теплоэнергии, необходимости резервирования и покрытия пиковых нагрузок иными источниками теплоснабжения.

Необходимо также отметить, что имеются также большие возможности повышения эффективности применения тепловых насосов за счет понижения температуры хладагента перед первым теплообменником при увеличении потока байкальской воды, в том числе путем использования непосредственного нагрева хладагента в озера Бакал или в реке Ангара с использованием естественной или принудительной циркуляции воды.

Существенные возможности повышения эффективности имеются также за счет оптимизации состава используемого оборудования и режимов его работы. Эту оптимизацию можно осуществлять на основе излагаемой далее методике расчета математического ожидания затрат на теплоснабжение на базе использования имитационного моделирования функционирования системы теплоснабжения.

3. Описание динамики потребности в теплоэнергии в теплоэнергии базы отдыха по часам года

Предлагаемая методика анализа и оптимизации эффективности теплоснабжения зданий на побережье озера Байкал на базе тепловых насосов является конкретизацией ранее высказанных положений об использовании для этих и аналогичных целей имитационного моделирования [2]. Этот подход использует многократную имитацию функционирования объектов и систем при возможных периодических и случайных изменений условий, формируемых методом Монте-Карло. Для исследования процессов теплоснабжения объектов такая имитация должна охватывать период в один год с учетом изменений условий в течение каждого часа. Исходной информацией для имитации должно стать описание возможных регулярных и случайных изменений потребностей в теплоэнергии.

Предположения. Считаем, что:

- 1) продолжительность года составляет 8760 часов (ровно 365 суток);
- 2) нумерация $t=1, \dots, 8760$ соответствует номерам часов года, начинающегося ($t=1$) в 1 час ночи 1 января;
- 3) в летний период с $\check{t}$ часов по $\hat{t}$ часов в связи с потеплением и необходимостью проведения профилактических и ремонтных работ тепловые насосы не используются (например, с конца мая $\check{t}=3360$ по конец июля $\hat{t}=5800$).

Считаем также, что потребность в теплоэнергии базы отдыха Q_t в час года t состоит из потребности в теплоэнергии на нужды отопления Q_t^1 и потребности Q_t^2 в теплоэнергии на горячее водоснабжение (в т.ч. на санитарно-гигиенические нужды, пищеприготовление)

$$Q_t = Q_t^1 + Q_t^2.$$

В первом приближении можем считать, что потребность в теплоэнергии на нужды горячего водоснабжения неизменна во времени

$$Q_t^2 = \bar{Q},$$

где $\bar{Q}$ - средний уровень часовой потребности на горячее водоснабжение. В дальнейшем следует учитывать сезонные и суточные колебания этой

потребности, возможности ее регулирования за счет накопления горячей воды в периоды избытка мощности теплового насоса.

Потребность в теплоте на цели теплоснабжения считаем пропорциональной разности желаемой (комфортной, нормативной) температуры внутри здания T_N и температурой наружного воздуха T_t в данный час t

$$Q_t^1 = k(T_N - T_t),$$

где k - коэффициент пропорциональности, зависящий от состава отапливаемых помещений и теплоизоляции зданий. Будем считать, что температура внутри здания равна 20°C , т.е. $T_N = 20$.

При задании данных о температуре наружного воздуха можно воспользоваться двумя вариантами действий.

1. Использовать имеющиеся данные о температурах воздуха по часам года (за один или лучше за несколько лет) полученные из метеонаблюдений для данной территории.

2. Использовать расчетные величины T_t , базирующиеся на представлении почасовых изменений температур в виде взаимодействия трех составляющих:

- 1) сезонных колебаний температур S_t ;
- 2) среднесуточных отклонений температур Z_t ;
- 3) случайные отклонения ε_t .

При аддитивном характере взаимодействия указанных составляющих

$$T_t = S_t + Z_t + \varepsilon_t + T_0,$$

где T_0 -среднегодовая температура. Например, для побережья Малого моря можно принять $T_0 = -1^\circ \text{C}$. Сезонные колебания в первом приближении можно представить в виде тригонометрической функции

$$S_t = -\frac{a}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{8760}(t - 24d)\right).$$

Здесь a - амплитуда сезонных колебаний, выраженная в градусах цельсия. Например, можно считать $a = 40^\circ \text{C}$. Число d соответствует дню статистически самой низкой зимней температуры. Например, можно принять $d=15$, что соответствует предположению, что в среднем пик зимнего похолодания приходится на 15 января.

Суточные отклонения можно также представить в виде строго тригонометрической функции:

$$Z_t = \frac{b}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{24}(t - r)\right).$$

Здесь величина b соответствует амплитуде среднесуточных отклонений от температур, выраженных в градусах Цельсия. Например, можем принять $b = 20^\circ\text{C}$. Величина r соответствует часу дня, который можем считать наиболее теплым. Например, если это 2 часа дня, то $r = 14$.

Значение ε_t характеризует случайные относительные отклонения от произведения сезонных и среднесуточных отклонений. Эта величина формируется случайным образом из некоторого отрезка $[\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$ при

$$\underline{\varepsilon} < 0 < \bar{\varepsilon}.$$

Выбор ε_t осуществляется на базе метода Монте-Карло по заданному закону вероятности с учетом наличия положительной автокорреляционных связей отклонений температур для соседних часов. Например, можно воспользоваться таким алгоритмом. Зададим значение максимального случайного отклонения $c > 0$. В частности можем считать $c = 15$. Пусть

$$\bar{\varepsilon} = c, \quad \underline{\varepsilon} = -c.$$

Можем считать, что

$$\varepsilon_0 = 0$$

Пусть

$$\varepsilon_t = \alpha \rho_t + (1 - \alpha) \varepsilon_{t-1}, t = 1, \dots, 8760$$

где α - заданная величина из интервала $(0,1)$. Например, можно положить $\alpha = 0,5$. Значение ρ_t выбираем случайным образом из интервала $[\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$. Можем считать плотность вероятности реализации случайной величины ρ_t на данном интервале постоянной.

4 Алгоритм расчета математического ожидания приведенных затрат

В рассматриваемой здесь постановке задачи анализа и оптимизации эффективности теплоснабжения баз отдыха на Байкале требуется обеспечивать заданную потребность в теплоэнергии (формируемую с учетом действия случайных факторов) с минимальными затратами. В принципе можно рассматривать постановки, в которых учитывается влияние затрат на объемы потребности. Например, в холодные периоды года можно вводить повышенную стоимость проживания на турбазе, что будет вести к снижению количества желающих проживать на ней и к снижению потребности в

теплоэнергии. В излагаемой далее методике такого типа обратные связи не учитываются.

В качестве критерия для сопоставления вариантов энергообеспечения здания (базы отдыха) предлагается использовать минимизацию математического ожидания приведенных затрат. Этот показатель вычисляется по формуле

$$S = EK + \bar{C},$$

где K – капитальные вложения (руб.), инвестиции, которые необходимо сделать для функционирования рассматриваемого варианта теплоснабжения, E – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (1/год), $\bar{C}$ – математическое ожидание годовых текущих издержек (руб./год). Нормативный коэффициент эффективности предназначен для соизмерения в единый по размерности показатель разовых инвестиций и ежегодных текущих затрат. Он имеет несколько интерпретаций. Одна из них – проценты за кредит, если считать, что капиталовложения делаются за счет заемных средств. Обратную к E величину можно также интерпретировать как расчетный срок окупаемости капиталовложений. Так значению $E=0.12$ соответствует срок окупаемости 8 лет.

Величину математического ожидания текущих издержек предлагается рассчитывать на основе многократной имитации функционирования рассматриваемой системы теплоснабжения по правилу

$$\bar{C} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T C_{\tau} + D$$

где C_{τ} – переменная составляющая годовых издержек, зависящая от реализации в данном году потребностей в теплоэнергии Q_t^{τ} . Здесь τ – номер имитации годового функционирования системы теплоснабжения, T – количество осуществляемых имитаций. Для достижения устойчивых результатов предлагается использовать значение T примерно равным 50000.

Величина D обозначает постоянные, не зависящие от случайных реализаций потребностей, текущие издержки. Например на содержание обслуживающего персонала, затраты на регулярные ремонтно-профилактические работы.

Расчет переменных текущих издержек. Он базируется на реализации с использованием метода Монте-Карло потребностей в теплоэнергии Q_t^{τ} по часам $t = 1, \dots, 8760$ года и $\tau = 1 \dots, T$. Считается заданной мощность теплового насоса $\bar{R}$ – величина максимальной тепловой энергии, которая может быть получена от его работы в течение часа. Эта мощность, как и другие параметры могут варьироваться при решении задачи выбора оптимального состава оборудования. Когда состав оборудования задан (именно для таких

условий излагается здесь методика расчета математического ожидания затрат), то считается заданной и величина $\bar{R}$.

Для каждого часа рассчитывается величина теплоэнергии вырабатываемая тепловым насосом по правилу

$$R_t^r = \min\{Q_t^r, \bar{R}\}.$$

Здесь $\bar{R}$ – мощность теплового насоса, максимальный объем теплоэнергии, который может им вырабатываться за час.

На основе построенных ранее характеристик определяется потребность теплового насоса в электроэнергии в данном часу

$$P_t^r = f(R_t^r).$$

Здесь f зависимость потребляемой тепловым насосом электроэнергии от вырабатываемой им теплоэнергии за час. Функция f в простейшей форме может иметь следующий вид [8]

$$P_t^r = \frac{R_t^r}{c},$$

где c – коэффициент производительности теплового насоса, указанный его изготовителем в документации. Однако часто изготовитель приводит коэффициент производительности только самого блока теплового насоса, а не всей системы в сборе.

Функция f может быть также приближённо определена исходя из цикла Карно [8]

$$P_t^r = \frac{R_t^r q (T_H - T_A)}{T_H},$$

где T_H – температура на выходе теплового насоса, измеряемая в K , T_A – температура на входе теплового насоса, измеряемая в K . Коэффициент q , отражающий тепловые, механические и электрические потери в тепловом насосе, можно принять равным 2.

Если мощность теплового насоса не достаточна для покрытия всей потребности, то используется электрообогрев. Объем требуемой в данном часу электроэнергии на электрообогрев рассчитывается по формуле

$$N_t^r = h(Q_t^r - R_t^r),$$

где h – коэффициент перевода тепловой энергии в электрическую.

Суммарный расход электроэнергии в данном часу определяется по правилу

$$\Xi_t^r = P_t^r + N_t^r,$$

Пусть p цена единицы электроэнергии. Затраты на электроэнергию для теплоснабжения в данном часу определяются по формуле

$$V_t^{\tau} = p\Delta_t^{\tau},$$

Суммируя по всем дням рассматриваемого года получаем значение

$$C_{\tau} = \sum_{\tau=1}^T V_t^{\tau}.$$

Отметим, что в периоды проведения ремонтно-профилактических работ тепловой насос не используется. В этот период теплоснабжение осуществляется только за счет электрообогрева.

Литература

1. Губий Е.В., Зоркальцев В.И. Эффективность энергетических плантаций. Новосибирск: "Наука", 2018. 96 с.
2. Рей Д. Тепловые насосы : пер. с англ. / Д. Рей, Д. Макмайл. - М. : Энергоиздат, 1982. -224 с.
3. Зоркальцев В.И., Губий Е.В. Анализ экономической эффективности природосберегающих технологий / System analysis & mathematical modeling. - Т. 2. - № 1. - 2020. - С. 15-21.
4. Зоркальцев В.И., Губий Е.В. Методика оценки эффективности инфраструктурных экологических технологий для побережья озера Байкал // Актуальные вопросы аграрной науки. - № 34. - С. 67-78.
5. Gubiy, E. The Markov Chain of Energy Carryover Reserves in Models of Power Supply Reliability in Remote // E3S Web of Conferences International Conference of Young Scientists "Energy Systems Research 2019". – 2019. – V. 114.
6. Губий, Е. В. Марковская последовательность переходящих запасов топлива / Е.В.Губий, В.И.Зоркальцев // Научный вестник НГТУ. – 2019. – Том 74. – № 1. – С.181–196.
7. Елистратов С.Л., Накоряков В.Е., Клер А.М., Маринченко А.Ю. Тепловые насосы для теплоснабжения в рекреационных зонах // В монографии «Исследования и разработки СО РАН в области энергоэффективных технологий» под общей редакцией член-корр. РАН С. В. Алексеенко. – Новосибирск.: Наука, 2009г.
8. J. Bonin. Heat pump planning handbook (ed.), Routledge, New York, 2015.

Важность повышения точности мониторинга уровня воды водохранилищ каскада Ангарских ГЭС

Николаев А. А., аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет

Аннотация. В статье рассматривается критическая важность точного измерения уровня воды в озере Байкал для управления каскадом Ангарских ГЭС. На основе анализа нормативного документа СТО РусГидро 06.01.84 2013 и различных научных исследований показано, что погрешности в определении уровня Байкала приводят к значительным экономическим потерям в энергетике и нарушению водохозяйственного баланса.

Ключевые слова: Байкал, Иркутская ГЭС, каскад ГЭС, водноэнергетический режим, мониторинг уровня воды озера Байкал.

Своевременный мониторинг и прогнозирование наполнения водохранилищ ГЭС являются ключевыми факторами для расчета и регулирования режимов работы ГЭС.

После ввода каскада ангарских ГЭС в эксплуатацию естественный гидрологический режим Ангары был коренным образом преобразован. Река превратилась в цепь глубоководных водохранилищ, а её сток стал объектом диспетчерского управления и мониторинга. В этих условиях количественная оценка вклада различных боковых притоков в водный баланс Ангары приобретает важнейшее значение. Антропогенное регулирование стока через каскад ГЭС превратило Ангару в технологическую систему, где водный баланс стал объектом управления.

Энергетическая эффективность этой системы напрямую зависит от точности мониторинга и прогнозирования стока, как из Байкала, так и со стороны основных боковых притоков. Прогнозирование и предварительный расчет ожидаемого уровня воды водохранилищ всего каскада ГЭС имеет огромное значение в регулировании водного стока и в обеспечении режима специального весеннего попуска в низовья, ежегодно проводимого в интересах рыбного и сельского хозяйства.

Эта роль заключается в преобразовании поступающих в водохранилища ГЭС весенних и ливневых пиковых притоков в заданный режим сбросных расходов, соответствующий графику спецпропуска.

Основным хранилищем воды всего каскада является озеро Байкал, которое вмещает в себя порядка 23 615 км³ пресной воды. Даже небольшое колебание уровня наполнения озера составляет огромный объем воды. Например, при изменении уровня озера на 1 см, объем воды составит ≈ 0.317 км³.

Для регулирования и сдерживания скачков уровня Байкала с 2001 года действовал фиксированный диапазон колебаний – от 456 до 457 метров. Но с течением времени стало понятно, что выдерживать его стабильно нельзя. Особенно в засушливые годы, когда воды просто не хватает, или во время сильных паводков.

Например, в 2015 году уровень Байкала опускался ниже допустимого минимума, что вызвало перебои с водоснабжением в прибрежных населённых пунктах. В 2018 наоборот, уровень поднялся выше предела, угрожая подтоплениями.

Таким образом, постановление Правительства РФ от 11.04.2025 №481 устанавливает новые предельные значения колебаний уровня воды в озере Байкал на период с 2025 по 2027 годы и устанавливает, что при средней водности уровень воды в Байкале должен находиться в пределах от 456 до 457 метров по тихоокеанской системе высот.[1].

В маловодные периоды минимальный допустимый уровень снижается до отметки 455,54 метра. В многоводные периоды допускается повышение уровня до 457,85 метра.

Новые параметры уровня озера подразумевают и новые нормативы по минимальным и максимальным расходам воды через гидроэлектростанцию. Минимальный расход для иркутской ГЭС – 1300 кубометров в секунду, максимальный – 4500. Выход за эти пределы может привести к нежелательным последствиям, например, к затоплению части Иркутска.

Неточное измерение уровня воды приводит к потере потенциальной энергии, так как уровень воды – это запасённая потенциальная энергия. Если прогноз притока был занижен, а реальный приток оказался высоким, станция работает с неоптимальным расходом, оператор будет стремиться накопить воду в водохранилище. В краткосрочной перспективе это кажется выгодным, но в период паводка это приведёт к вынужденному холостому сбросу избытка воды, когда уровень приблизится к критической отметки.

Аналогичная ситуация будет если прогноз притока завышен, то станция будет работать с повышенным расходом. Если паводок не оправдается, водохранилище будет излишне сработано, и в будущем для генерации будет доступно меньше воды.

Таким образом, прямые потери оцениваются в десятки и сотни тысяч рублей в сутки на каждой станции, в зависимости от величины ошибки и пропущенного через холостые сбросы расхода. Для примера проведем расчет по стандарту СТО РусГидро 06.01.842013, который составляет основу управления работой ГЭС.[2]

Мощность выработки электроэнергии на данной ГЭС выражается следующей формулой:

$$N_{ГЭСij} = 9,81 \cdot Q_{ГЭСij} \cdot H_{ГЭСij} \cdot \eta_{ГЭСij}, \quad (1)$$

Здесь:

$Q_{ГЭСij}$ – расход воды j-й ГЭС в i-м расчетном интервале времени,
 $H_{ГЭСij}$ – напор j-й ГЭС в i-м расчетном интервале времени (для Иркутской ГЭС ~ 31 м),
 $\eta_{ГЭСij}$ – КПД j-й ГЭС среднее за расчетный интервал времени i (вычисляется по эксплуатационной характеристике на линиях ограничения по напору и мощности, для Иркутской ГЭС около 0.85-0.9).

Для примера расчета примем, что из-за метрологической ошибки приходится сбрасывать холостым способом 500 м³/с, то тогда потери мощности составят:

$$P = 9.81 * 0.87 * 31 * 500 \approx 132\,000 \text{ кВт (132 МВт)}$$

За сутки такие потери составят 3 168 МВт*ч. При средней цене по расходу до 2000 кВт, возьмем 1.8 рубля за кВт*ч, тогда финансовые потери за сутки составят около 5,7 млн рублей.

Предварительная оценка влияния погрешности измерения уровня воды Байкала показала, что по каскаду происходит затухание, то есть для Иркутской ГЭС уровень Байкала имеет определяющее влияние, а для Братской ГЭС влияние оценивается как незначительное около 10% от суммарной погрешности, так как основное влияние уже вносят боковые притоки ниже по течению Ангары, нежели сам Байкал. На рисунке 1 можно отметить основные притоки реки Ангара, а именно Иркут, Ока, Ия, Илим.

В данном примере мы не учитываем реки Бирюса и Уда, так как они впадают в Ангару в нижнем бьефе Богучанской ГЭС.

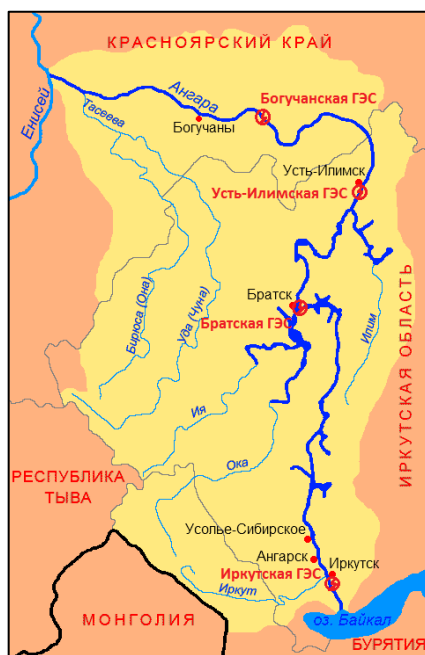


Рис. 1. Схема бассейна реки Ангара.

Проведя анализ открытых источников, была составлена таблица 1, с примерным средним многолетним расходом воды рек [3-9]. А так же проведен пересчет в годовой сток по формуле

$$V \text{ (м}^3\text{)} = Q \text{ (м}^3\text{/с)} * 31\,536\,000 \text{ с.} \quad (2)$$

Получим следующую формулу для расчетов:

$$V \text{ (км}^3\text{)} \approx Q \text{ (м}^3\text{/с)} / 31,71$$

Таблица 1 – Среднегодовой расход рек бассейна реки Ангара

Приток	Примерный средний расход (м³/с)	Примерный годовой сток (км³)	% от стока Ангара у устья
Исток (Байкал)	1920	60,55	61,94
Иркут	140	4,42	4,52
Китой	126	3,97	4,06
Белая	178	5,61	5,74
Ока	274	8,64	8,84
Ия	150,2	4,74	4,85
Илим	100	3,15	3,23
Прочие (суммарно)	211	6,68	6,83
сток Ангара у Богучанской ГЭС	3100	97,76	100%

Для снижения метрологических ошибок измерения и более точного учета влияния боковых притоков, была разработана и на текущий момент постоянно модернизируется система повышенной точности измерения уровня воды. [10]

Данная разработка позволит с высокой точностью измерять уровень воды в Байкале, составлять прогнозы по заблаговременному регулированию режимов работы ГЭС и сбросных расходов.

Расположение измерительных станций высокой точности по акватории озера Байкал позволит фиксировать фактическое изменение уровня воды, а так же фиксировать изменение уровня локально.

Подобная система способна через один параметр учитывать множество факторов, влияющих на изменение уровня воды в водохранилище, например, такие как: потери на испарение, потери на ледообразование, боковые притоки рек, грунтовые и подземные воды и другие факторы, влияющие на изменение уровня воды.

Таким образом, проведенный анализ подчеркивает важность внедрения высокоточной системы мониторинга, с возможностью прогнозирования водного баланса для устойчивого и эффективного управления Ангарским каскадом ГЭС.

Заключение

В данной статье было показано, что точность измерений напрямую определяет энергоэффективность режимов работы ГЭС, а так же оказывают особое влияние на экономическую составляющую. Высокая погрешность в оценке уровня воды озера Байкал, приводят к неоптимальным режимам работы ГЭС, что вызывает либо вынужденные холостые сбросы воды в многоводные периоды, либо необоснованное срабатывание водохранилищ в маловодные периоды, что так же влечет за собой финансовые потери.

Наиболее оптимальным технологическим решением является внедрение системы высокоточного мониторинга уровня воды, как в водохранилищах каскада Ангарских ГЭС, так и основных притоков рек бассейна Ангары.

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 11 апреля 2025 г. N 481 "О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2025-2027 годах", Статья:, 2025.
2. Стандарт организации СТО РусГидро 06.01.84-2013 от 03.10.2013 №954 [Электронный ресурс] // Статья: [сайт]. [2026] URL: https://volgaltd.ru/images/standart/078_sto-rusgidro-06_01_84-2013_planirovanie-vodnoenergeticheskikh-rezhimov.pdf. (дата обращения 09.02.2026).
3. Большая советская энциклопедия. в 30-ти т.. – 3-е изд.. – М. : Совет. энцикл., 1969 - 1986. ил., карт. [Электронный ресурс] // Статья: [сайт]. [2026]. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/056/290.htm> (дата обращения 09.02.2026).
4. Большая советская энциклопедия. в 30-ти т.. – 3-е изд.. – М. : Совет. энцикл., 1969 - 1986. ил., карт. [Электронный ресурс] // Статья: [сайт]. [2026]. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/056/518.htm> (дата обращения 10.02.2026).
5. Короткий Л.М. Географическая энциклопедия Иркутской области / Т.В. Бережных, Е.П. Бессолицына, О.В. Валеева, и др.// Географическая энциклопедия Иркутской области. От А до Я / Ред. Л.М. Короткий. – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2019 – 199 с., [12] с. цв. ил.
6. Большая советская энциклопедия. в 30-ти т.. – 3-е изд.. – М. : Совет. энцикл., 1969 - 1986. ил., карт. [Электронный ресурс] // Статья: [сайт]. [2026]. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/083/883.htm> (дата обращения 10.02.2026).
7. Большая советская энциклопедия. в 30-ти т.. – 3-е изд.. – М. : Совет. энцикл., 1969 - 1986. ил., карт. [Электронный ресурс] // Статья: [сайт]. [2026]. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/122/830.htm> (дата обращения 10.02.2026).

8. Большая советская энциклопедия. в 30-ти т.. – 3-е изд.. – М. : Совет. энцикл., 1969 - 1986. ил., карт. [Электронный ресурс] // Статья: [сайт]. [2026]. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/056/290.htm> (дата обращения 10.02.2026).
9. Гагаринова О.В., Цыганкова М.В. Ландшафтно-гидрологический анализ условий формирования паводка на реке Ие в июне 2019 года / О.В. Гагаринова, М.В. Цыганкова // География и природные ресурсы.- Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Сибирское отделение РАН, 2020, -С. 77-85.
10. Николаев А.А. Разработка инновационного метода определения уровня воды открытых водоемов с возможностью радиоканальной передачи телеметрических данных / А.А. Николаев // Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири».- Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022, -С. 333-338.
11. Никитин В.М. Концептуальные и методические основы мониторинга и прогнозирования уровня режима озера Байкал / В.М. Никитин, Н.В. Абасов, Е.Н. Осипчук и др. // Отчет о научно-исследовательской работе по договору № 2.0110.20.10-нир от 12.10.2020 по крупному научному проекту фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки байкальской природной территории.
12. Вильвовский А.Е. Анализ водно-энергетических режимов и выработки электроэнергии иркутской ГЭС / А.Е. Вильвовский, А.А. Бухаев, А.Ю. Головков, Г.П. Муссонов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири».- Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023, -С. 76-80.
13. Зоркальцев В.И. Проблема регулирования уровня озера Байкал / В.И. Зоркальцев, А.Д. Калихман, Т.П. Калихман, В.Н. Синюкович // Сибирское отделение РАН, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, АНО "Редакция журнала "ЭКО", 2022, -С. 24-43.
14. Никитин В.М. Риски затопления нижнего бьефа иркутской ГЭС при регулировании уровня озера Байкал / В.М. Никитин, Н.В. Абасов, Е.Н. Осипчук и др. // География и природные ресурсы, Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Сибирское отделение РАН, 2024, -С. 130-138.
15. Никитин В.М. Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал / И.В. Бычков, В.М. Никитин // География и природные ресурсы, Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Сибирское отделение РАН, 2022, -С. 13-24.

Создание системы регулярных наблюдений за природными процессами на побережье и в акватории озера Байкал

Опарин К.А., магистрант БГУ.

Аннотация. Излагается проект по созданию и внедрение комплексной, интеллектуальной системы регулярных наблюдений за природными процессами на побережье и в акватории озера Байкал. В условиях возрастающего антропогенного воздействия, изменения климата и необходимости принятия научно обоснованных управленческих решений, существующие разрозненные и часто недостаточные данные о состоянии экосистемы Байкала не позволяют оперативно реагировать на угрозы и эффективно планировать природоохранные мероприятия. Хотя Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) уже проводит государственный мониторинг (согласно, например, положению № 260), предлагаемый проект призван расширить, углубить и интегрировать все данные в единую систему.

Ключевые слова. Мониторинг. Экосистема Байкала. Приведенные затраты.

1. Введение

Целью рассматриваемого проекта является создание и внедрение интегрированной, многофункциональной, автоматизированной системы регулярного мониторинга природных процессов и антропогенного воздействия на побережье и в акватории озера Байкал, обеспечивающей сбор, анализ и оперативное предоставление актуальных данных для научно обоснованного управления и прогнозирования.

Основные задачи проекта:

- 1) разработка архитектуры и технических требований к комплексной системе мониторинга;

- 2) создание и развертывание сети наземных, водных и подводных станций наблюдения;
3. Интеграция данных существующих мониторинговых систем (включая Росгидромет) с вновь создаваемой инфраструктурой.
4. Разработка и внедрение централизованной цифровой платформы для сбора, обработки, анализа, визуализации и хранения данных.
5. Подготовка квалифицированных кадров для работы с системой.

Ожидаемые результаты. Основным результатом станет функционирующая «Цифровая модель Байкала» – единая, постоянно обновляемая база данных о состоянии экосистемы, доступная для ученых и управляющих органов. Это обеспечит получение данных в режиме, близком к реальному времени; раннее выявление экологических угроз, повышение точности экологического прогнозирования, создание прозрачной информационной среды для всех заинтересованных сторон.

Значимость проекта. Проект имеет критическое значение для сохранения уникальной экосистемы Байкала, предоставляя точную и своевременную информацию, необходимую для принятия эффективных управленческих и природоохранных решений на всех уровнях. Это позволит перейти от реактивного реагирования на кризисы к проактивному, научно обоснованному управлению объектом Всемирного наследия.

2. Содержание проекта

Уникальная экосистема озера Байкал – крупнейшего пресноводного водоема планеты и объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО – находится под возрастающим давлением со стороны человека и природных процессов, усугубляемых изменением климата. Для эффективного сохранения Байкала крайне необходима полноценная, интегрированная и оперативная система регулярных наблюдений (мониторинга) за его состоянием и происходящими в нем процессами.

Составляющие проблемы.

1. Недостаточная полнота и глубина данных: Существующие системы мониторинга, включая государственный мониторинг, проводимый Росгидрометом в части состояния и загрязнения окружающей среды, а также ведомственные и научные наблюдения, не всегда охватывают весь спектр необходимых параметров и территории. Недостаточно данных по биоразнообразию (особенно на глубоководных участках), геологическим процессам, миграциям животных, микрозагрязнениям.

2. Фрагментация и разобщенность данных: Информация собирается различными ведомствами и научными учреждениями (Росгидромет, Росрыболовство, институты РАН, региональные структуры) по своим программам. Эти данные часто хранятся в разных форматах, на разных платформах и не интегрированы в единую систему. Это затрудняет комплексный анализ, сравнение и выявление скрытых взаимосвязей.

3. Отсутствие оперативного реагирования: Данные зачастую поступают с задержкой, что не позволяет оперативно выявлять и предотвращать экологические инциденты. К моменту получения информации ущерб уже может быть нанесен.

4. Низкая прогностическая способность: без полных, долгосрочных и интегрированных данных невозможно строить точные модели и прогнозировать изменения экосистемы Байкала под влиянием климатических изменений и антропогенных факторов. Это затрудняет стратегическое планирование.

5. Технологическая устарелость: Часть существующего оборудования и методик мониторинга может быть устаревшей, не обеспечивающей достаточной точности, частоты или автоматизации сбора данных.

6. Недостаточная прозрачность и доступность: Сложность получения и использования данных для широкого круга исследователей, общественности и даже управляющих структур затрудняет общественный контроль и вовлеченность.

Масштабы проблемы.

Проблема охватывает всю Байкальскую природную территорию, включая 31 722 км² акватории озера, его водосборный бассейн (около 590 000 км²) и прилегающие к озеру особо охраняемые природные территории. Недостаток информации влияет на все аспекты управления: от определения квот на вылов рыбы и регулирования стоков до планирования туристической деятельности и борьбы с лесными пожарами. Недостаток знаний ведет к неверным решениям, которые могут иметь необратимые последствия для уникальной экосистемы Байкала и его глобальной значимости как источника чистой воды и объекта природного наследия. Без точных и оперативных данных невозможно эффективно бороться с уже имеющимися проблемами и предотвращать новые.

Возможные варианты решения проблемы.

1. Сохранение текущего подхода (лоскутный мониторинг):

Плюсы: Минимальные затраты, отсутствие необходимости в реформах.

Минусы: Продолжение фрагментации, неполнота данных, отсутствие оперативного реагирования, неэффективность управления, дальнейшая деградация экосистемы.

2. Увеличение количества существующих наблюдений (без интеграции).

Плюсы: больше данных по отдельным параметрам.

Минусы: Проблема фрагментации сохраняется, данные разрознены и сложны для комплексного анализа, затраты могут быть высоки при низкой эффективности.

3. Передача всего мониторинга одному существующему ведомству (например, Росгидромету) без модернизации.

Плюсы: Условная централизация.

Минусы: Существующие ведомства могут не иметь компетенций и ресурсов для всех видов мониторинга (например, глубоководного биологического). Требуется значительного расширения функций и переоснащения, что равносильно созданию новой системы.

4. Комплексная, интегрированная, интеллектуальная система мониторинга (предлагаемое решение):

Плюсы: Полный охват параметров, оперативный сбор и анализ данных, прогностическая способность, научная обоснованность решений, максимальная эффективность использования ресурсов.

Минусы: Высокая сложность и значительные начальные затраты на создание и внедрение.

Преимущества предлагаемого проекта

Комплексность и всесторонний охват: Система будет собирать данные по всем ключевым природным процессам (гидрология, климат, геодинамика, качество воды и воздуха, состояние биоразнообразия – от микроорганизмов до крупных животных) на всех уровнях (побережье, мелководье, глубоководье, атмосфера).

Интеграция данных и централизованный анализ: Все данные, включая те, что уже собирает Росгидромет, а также от других ведомств и научных учреждений, будут поступать в единую цифровую платформу. Это позволит проводить всесторонний анализ, выявлять взаимосвязи, которые сейчас не видны и получать целостную картину здоровья Байкала.

Оперативность и реагирование в реальном времени: Использование автоматизированных станций, спутников, дронов и подводных роботов позволит получать информацию практически мгновенно. Система сможет автоматически поднимать тревогу при выявлении аномалий, давая возможность быстро отреагировать и предотвратить ущерб.

Прозрачность и доступность информации: Единая платформа позволит предоставлять агрегированные данные общественности, ученым и международным организациям.

Таким образом, данный проект не просто добавляет новые датчики, а строит единую нервную систему для Байкала, обеспечивая его постоянный "диагностический осмотр" и давая возможность принимать умные, взвешенные решения для его сохранения.

Характеристики, в том числе количественные, затрат и результатов прямых и косвенных по рассматриваемому проекту

Самый главный результат – это постоянно обновляющаяся, подробная и интерактивная карта, которая в режиме реального времени показывает, в каком состоянии находится озеро. Это как умный медицинский прибор, который 24 часа в сутки следит за здоровьем всего Байкала и его окрестностей.

Прямые положительные результаты (в течение 5 лет реализации):

1. Созданная сеть мониторинга.

Развернуто не менее 50-70 новых автоматизированных береговых станций (для мониторинга атмосферы, почвы, наземной флоры и фауны).

Установлено не менее 30-40 новых плавучих буйев и подводных станций в акватории озера (для мониторинга качества воды, течений, температуры, гидробионтов).

Создано 2-3 специализированных научно-исследовательских судна/платформы, оснащенных современным оборудованием для глубоководных исследований и отбора проб.

Внедрено использование 5-10 специализированных дронов и 3-5 подводных автономных аппаратов (роботов) для обследования труднодоступных участков и глубоководья.

Интегрировано не менее 80% данных от существующих станций Росгидромета и других ведомств в единую систему.

2. Сбор данных.

Мониторинг ключевых параметров (температура воды/воздуха, химический состав воды, уровень воды, течения, ветровой режим, состав атмосферы, радиационный фон, популяции фито- и зоопланктона, бактерий, бентоса, виды рыб, состояние лесов, количество туристов и т.д.).

Получение данных в режиме, близком к реальному времени для критически важных параметров.

3. Аналитика и прогнозирование.

Разработана и функционирует Единая Цифровая Платформа Байкала (ЕЦПБ) для сбора, обработки, хранения и визуализации данных.

Внедрены алгоритмы ИИ и машинного обучения, способные выявлять аномалии и формировать автоматические предупреждения о потенциальных угрозах.

Разработаны прогностические модели по изменению климата и его влиянию на Байкал с точностью прогноза на 5-10 лет, улучшенной на 20-30%.

4. Кадры и управление.

Подготовлено высококвалифицированные специалисты (инженеры, программисты, биологи, гидрологи, аналитики данных) для работы с системой.

5. Будет создан постоянно действующий Оперативный центр мониторинга Байкала.

Косвенные положительные эффекты.

Научные открытия: Огромный объем новых данных послужит основой для научных исследований и открытий об озере Байкале.

Экономия ресурсов. Предотвращение ущерба от загрязнений и неэффективных решений сэкономит миллиарды рублей.

Улучшение экологии. Раннее выявление проблем позволит быстрее их решать, способствуя оздоровлению экосистемы.

Развитие экотуризма. Точная информация о чистоте и безопасности озера повысит его привлекательность для ответственных туристов.

Повышение экологической культуры. Доступность информации позволит всем лучше понимать Байкал и бережнее к нему относиться.

Международное сотрудничество. Байкал станет эталонной площадкой для мировых исследований в области экомониторинга.

Отрицательные эффекты (минимизируемые).

Высокие затраты. Проект требует значительных финансовых вложений на начальном этапе.

Сложность обслуживания. Современная техника требует квалифицированного персонала и регулярного обслуживания.

Потенциальная уязвимость. киберугрозы для системы сбора и хранения данных.

Состав и размер требуемых затрат

Общий ориентировочный бюджет проекта (на 5 лет): 1 800 000 000 - 2 800 000 000 рублей.

Примерный расчет затрат:

Закупка и установка оборудования: ~900 млн - 1.4 млрд рублей

Разработка ПО и Цифровой Платформы: ~350 - 550 млн рублей

Зарплата для специалистов: ~300 - 450 млн рублей

Эксплуатация и развитие ~150 - 200 млн рублей

Налоги и непредвиденные расходы: ~100-150 млн рублей

$$C = И + E * K$$

Где:

$$И = 135 \text{ млн рублей/год}$$

$$K = 2300 \text{ млн рублей}$$

$$E = 0,12$$

$$C = 135 + 0,12 * 2300$$

$$C = 135 + 276$$

$$C = 411 \text{ млн руб./год}$$

Оценка ожидаемой прибыли.

Проект не является коммерческим. Его "прибыль" – это бесценные экологические, научные и социальные выгоды. Можно перечислить составляющие от достигаемого положительного эффекта (см. замечания редактора в конце статьи).

Сохранение уникальной экосистемы Байкала. Неоценимая стоимость.

Предотвращенный ущерб. за счет раннего выявления угроз, можно предотвратить экологический и экономический ущерб, который мог бы исчисляться десятками или сотнями миллиардов рублей.

Рост научного потенциала. Увеличение количества исследований, публикаций, привлечение молодых ученых.

Улучшение качества жизни. Повышение экологической безопасности для жителей региона.

Риски при реализации проекта.

Технические риски: Оборудование (датчики, буи, роботы, дроны) может сломаться из-за сурового климата Байкала, сильных волн или просто выйти из строя. Данные могут быть неточными или пропадать.

Чтобы минимизировать риски, требуется выбирать самое надежное оборудование, специально разработанное для сложных условий. Создать команду, которая будет быстро чинить или заменять сломанные приборы. Постоянно проверять, правильно ли приборы собирают данные.

Чтобы минимизировать риски кибератаки или сбоя в программном обеспечении, требуется использовать самые современные системы защиты от хакеров, регулярно обновлять программы, создавать резервные копии всех данных.

Финансовые риски. Стоимость проекта может оказаться выше, чем мы планировали, или денег может не хватить на все, или их могут перестать выделять. Поэтому требуется очень тщательно планировать бюджет, искать разные источники финансирования (государство, частные компании, международные фонды). Эффективно использовать все средства.

Кадровые риски. Возможно не получится найти достаточно инженеров, ученых, программистов, которые умеют работать с такой сложной системой. Поэтому требуется предлагать хорошую зарплату и интересную работу. Сотрудничать с университетами, обучать молодых специалистов. Рассказывать о проекте, чтобы люди сами захотели работать на Байкале.

3. Выводы

Анализ текущей ситуации с мониторингом озера Байкал показывает, что, несмотря на усилия Федеральной службы по гидрометеорологии и

мониторингу окружающей среды (Росгидромет, в соответствии с положением № 260) и других организаций, существующая система наблюдений является фрагментированной, недостаточно полной и не обеспечивает оперативного получения данных. Это приводит к задержкам в принятии управленческих решений, снижению их эффективности и невозможности адекватно прогнозировать изменения уникальной экосистемы в условиях роста антропогенного давления и климатических изменений.

Наш проект представляет собой стратегически необходимое решение, которое призвано устранить эти критические пробелы. Предлагаемая интегрированная, интеллектуальная система экомониторинга позволит перейти от реагирования на уже случившиеся проблемы к их раннему выявлению и проактивному управлению. Она объединит все источники данных, включая существующие наблюдения Росгидромета, с новой, современной инфраструктурой, создавая единую «Цифровую модель Байкала».

Несмотря на значительные затраты и ряд технических, финансовых и организационных рисков, создание такой системы мониторинга является жизненно важной инвестицией. Отказ от этого проекта или выбор менее комплексных альтернатив будет означать продолжение "слепого" управления и неизбежное усугубление экологических проблем.

Данный проект – это не просто набор приборов, это создание нового "зрения" для Байкала, которое позволит нам по-настоящему понять и, самое главное, сохранить это уникальное мировое природное достояние для всех будущих поколений.

Замечания научного редактора сборника

1. Тема проекта выбрана и разработана магистрантом Опариным К. А. полностью самостоятельно. Этот магистрант обучался дистанционно и не имел возможности самому выступить публично на семинаре и участвовать в обсуждениях эколого-экономических проблем

Байкала. При этом автор данной статьи вполне квалифицировано, очень системно изложил постановку важной проблемы создания научно проработанной системы мониторинга Байкальской природной территории.

2. Попытки постановки задачи разработки аналогичных постановочных проектов предпринимались в том числе на основе государственного финансирования. К сожалению эти «попытки» имели несколько сокрытый характер и не имели возможности для их рассмотрения и обсуждения специалистами. Увы, общепринятый во многих странах принцип общедоступности разработок финансируемых из государственного (включая региональный) бюджеты в нашей стране часто не исполняется.
3. Необходимо отметить, что озеро Байкал вполне «зарабатывает» ежегодно гораздо больше денег, чем приведенная сумма затрат на рассматриваемый проект 411 млн. рбл. в год. Например, четыре ГЭС на реке Ангара ежегодно вырабатывают более 60 млрд. квт. ч. почти «бесплатной» по текущим издержкам электроэнергии. Рентные дорходы от такого природного ресурса энергии можно оценить величиной не менее 5 центов за кВт. час. Что даст сумму более 300 млн. долл. США в год. Две трети этих рентных доходов дает энергия вод Байкала. То есть, ежегодно только рентные доходы ГЭС от вот озера Байкал превышают 10 млрд. рбл. в год.

Большие доходы, сопоставимые с приведенной выше суммой дает Байкал от посещения его побережья туристами и отдыхающими, от лечебниц на побережье Байкала, от разлива байкальской воды. И все это возможно только из-за природной уникальности Байкала. Это делает очень «рентабельными» мероприятия направленные на создание системы мониторинга, изучения и сохранения экосистемы Байкала.

Литература

1. Федеральный закон от 01.05.1999 № 94-ФЗ «Об охране озера Байкал».
2. Постановление Правительства РФ № 260 "Об утверждении Положения о государственном мониторинге уникальной экологической системы озера Байкал".
3. Коротный Л.А., Зырянов А.И. Байкал: проблемы охраны и управления. // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149. № 2. С. 13-24.
4. Кулагин В.А. и др. Развитие системы мониторинга уникальной экологической системы озера Байкал. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 129-140.

Применение модели декомпозиции временного ряда для краткосрочного прогнозирования цен

В.Э. Матибарчук, аспирант БГУ

Аннотация: Рассматривается модель декомпозиции временного ряда для краткосрочного прогнозирования цен. Модель включает полиномиальный тренд, периодические сезонные колебания и случайную составляющую. Для оценки параметров модели используется метод наименьших квадратов с весами экспоненциально возрастающими во времени. Это позволяет учитывать уменьшение информативности старых данных. Параметр темпа старения λ подбирается автоматически методом золотого сечения на основе минимизации среднеквадратичной ошибки пост-фактум прогноза, что указывает на низкую чувствительность цен к фактору старения данных. Результаты подтверждают применимость модели для анализа сезонности и тренда, а также подчёркивают необходимость индивидуального подбора параметра λ для различных товарных рынков.

Ключевые слова: временные ряды, прогнозирование, белокочанная капуста, сезонные колебания, экспоненциальные веса, золотое сечение, метод наименьших квадратов.

1. Введение

Прогнозирование временных рядов является одной из фундаментальных задач экономико-статистического анализа, особенно в сферах, где динамика показателей формируется под воздействием сезонных факторов, изменений рыночной конъюнктуры и технологических условий. Для повышения качества краткосрочных прогнозов широко применяются модели декомпозиции, позволяющие представить наблюдаемый ряд как сумму трендовой, сезонной и стохастической компонент. В настоящей работе рассматривается регрессионная модель, основанная на полиномиальном описании тренда и гармонической аппроксимации сезонности, с возможностью учёта уменьшения информативности наблюдений посредством экспоненциальных весов. Оптимизация параметра темпа старения данных λ осуществляется методом золотого сечения по критерию минимизации прогностической ошибки на пост-фактум интервале.

Цель исследования заключается в оценке применимости данной модели к краткосрочному прогнозированию цен и анализе влияния экспоненциального взвешивания на точность прогноза. Проведённый эксперимент на примере среднемесячных цен на белокочанную капусту показал, что использование экспоненциальных весов не всегда улучшает качество прогнозирования, что свидетельствует о высокой устойчивости структуры динамики и доминирующей роли исторической информации при построении регрессионной модели. Выбранный временной ряд служит

демонстрационным материалом, в то время как сама модель является универсальной и может применяться к широкому классу сезонных временных рядов — от аграрных продуктов до энергетических и макроэкономических показателей. Исходный временной ряд цен демонстрирует выраженную годовую сезонность, проявляющуюся в повторяющихся локальных максимумах в летний период и снижениях в зимние месяцы. Долгосрочный тренд умеренно возрастающий, после чего наблюдается ускорение роста, что согласуется с общей инфляционной динамикой продовольственных товаров. Амплитуда сезонных колебаний постепенно увеличивается, что отражает рост волатильности рынка свежих овощей в последние годы.

2. Описание модели

В основе используемого подхода лежит регрессионная модель, в которой наблюдаемое значение временного ряда x_t представляется в виде суммы трёх компонент: трендовой, сезонной и случайной. Основное уравнение модели имеет вид

$$x_t = y_t + s_t + \varepsilon_t, \quad t = 1, \dots, T,$$

где y_t — тренд, s_t — сезонная составляющая, а ε_t — случайная компонента, t — номер рассматриваемых периодов времени (месяцы или кварталы), T — общее количество рассматриваемых периодов времени, по которым имеются располагаемые данные о ценах. .

Тренд описывается полиномом степени n :

$$y_t = \sum_{i=0}^n a_i t^i$$

Этот полином отражает долговременное направление изменения уровня ряда.

Сезонная составляющая представляется как сумма периодических функций, каждая из которых может изменять форму и амплитуду со временем:

$$s_t = \sum_{i=0}^m s_i(t)$$

Базовая сезонная волна $s_0(t)$ характеризует среднюю волну годового цикла, а функции $s_i(t)$ при $i > 0$ описывают её постепенную трансформацию.

Каждая компонент $s_i(t)$ раскрывается через разложение в тригонометрический ряд Фурье:

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^{K/2} \alpha_{ij} \cos\left(\frac{2\pi j t}{K}\right) + \sum_{j=1}^{K/2-1} \beta_{ij} \sin\left(\frac{2\pi j t}{K}\right),$$

где K — количество наблюдений в году ($K=12$ для месячных данных, $K=4$ — для квартальных).

Общее количество подлежащих оценке параметров a_i , α_{ij} и β_{ij} модели определяется выражением:

$$r(n, m) = (1 + n) + (1 + m)(K - 1)$$

Эти параметры оцениваются методом наименьших квадратов. При этом учитывается возможность изменения информативности данных: в целевую функцию вводятся веса наблюдений. Разная информативность

исходных данных может быть учтена путем введения весов информативности b_t в минимизируемую функцию. В таком случае эта функция имеет вид

$$\sum_{t=1}^T b_t \varepsilon_t^2 \rightarrow \min.$$

В частности, для моделирования «старения данных» используются экспоненциальные веса следующего вида:

$$b_t = b^{\lambda t},$$

где λ — темп изменения информативности наблюдений. При $\lambda > 0$ наибольший вес получают данные наиболее близкие к окончанию рассматриваемого периода.

Оптимальное значение параметра λ не задаётся заранее, а выбирается по принципу минимизации среднеквадратической ошибки прогноза на *post factum* интервале:

$$\sigma(\lambda) = \left(\frac{1}{P - T} \sum_{t=T+1}^P (x_t - \hat{x}_t(\lambda))^2 \right)^{1/2}.$$

Весь период, по которому имеются отчетные данные $t=1, \dots, P$ разбивается на два подпериода. На периоде $t=1, \dots, P$ осуществляется оценка параметров модели при разных значениях темпа старения данных. Затем по приведенному выше критерию осуществляется поиск нового исследуемого значения темпа старения данных по алгоритму метода золотого сечения. Это обеспечивает сужение интервала локализации минимальной ошибки.

Полученная модель обладает высокой гибкостью и позволяет описывать тренд и сезонность как в отдельных временных рядах, так и в совокупности взаимосвязанных рядов, включая случаи балансовых ограничений. Кроме того, модель допускает применение различных схем взвешивания, позволяющих учитывать как качество данных, так и возможные структурные сдвиги.

Оптимальное значение параметра экспоненциального старения данных λ определяется не априори, а через минимизацию прогностической ошибки модели на *post factum* интервале. Поскольку функция ошибки $\sigma(\lambda)$ является одномерной, непрерывной на ограниченном интервале значений, для её минимизации применяется метод золотого сечения — классический безградиентный алгоритм одномерной оптимизации.

3. Пример применение модели к прогнозированию цен на белокочанную капусту

Для проведения вычислительных экспериментов исходный временной ряд, включающий 60 ежемесячных наблюдений (5 лет), был структурирован на два последовательно расположенных интервала. Первые 48 месяцев (4 года)

использовались в качестве обучающего интервала, на котором осуществлялась оценка коэффициентов полиномиального тренда и гармонической сезонной компоненты при различных значениях параметра λ .

Следующие 12 месяцев (5-й год наблюдений) формировали *post factum* интервал, предназначенный для оценки прогностической способности модели. Для каждого тестируемого значения λ модель, оценённая на обучающем интервале, использовалась для построения прогноза на данный год, после чего вычислялась среднеквадратичная ошибка между фактическими и прогнозными значениями. Полученная ошибка служила целевой функцией $\sigma(\lambda)$, минимизация которой методом золотого сечения позволяла определить оптимальную интенсивность экспоненциального взвешивания данных.

После нахождения оптимального значения λ модель повторно переоценивалась уже на всём доступном историческом интервале (60 месяцев), что обеспечивало использование всей накопленной информации. На основе полученных коэффициентов формировался прогноз на последующие 12 месяцев (6-й год), выходящие за пределы исходного ряда. Это обеспечивало сопоставимость результатов модели с экспоненциальным взвешиванием и модели без учёта эффекта «старения» данных ($\lambda = 0$). Горизонт прогноза, равный одному году, выбран исходя из сезонного характера данных и позволяет оценить способность модели корректно воспроизводить полный годовой цикл ценовой динамики.

4. Анализ выбросов и их влияние на устойчивость модели

В ходе анализа временного ряда была исследована устойчивость модели декомпозиции с полиномиальным трендом и гармонической сезонной компонентой к изменению параметра экспоненциального взвешивания. Оптимальное значение коэффициента информативности λ определялось методом золотого сечения на интервале $[0;1]$ путём минимизации среднеквадратической ошибки на обучающей выборке. В результате итерационной процедуры было получено значение $\lambda \approx 0,109$, при котором минимальное значение функции ошибки составило $MSE \approx 24,759$.

Полученное значение λ существенно отличается от нулевого, что свидетельствует о наличии умеренного эффекта «старения данных»: более свежие наблюдения оказывают несколько больший вклад в оценку параметров модели по сравнению с более ранними. Однако величина λ остаётся относительно небольшой, что указывает на отсутствие резких структурных сдвигов в ряде и на сохранение информативности исторических данных. Таким образом, экспоненциальное взвешивание в данном случае носит сглаженный характер и не приводит к радикальному перераспределению весов наблюдений.

Для наглядного сравнения поведения модели были построены два графика: первый отражает динамику исходного ряда, аппроксимацию модели и прогноз при оптимальном значении λ , найденном методом золотого сечения;

второй — аналогичное сравнение для случая $\lambda = 0$, когда все наблюдения имеют одинаковый вес. Сопоставление этих графиков позволяет оценить влияние механизма экспоненциального взвешивания на форму тренда, амплитуду сезонных колебаний и траекторию прогноза.

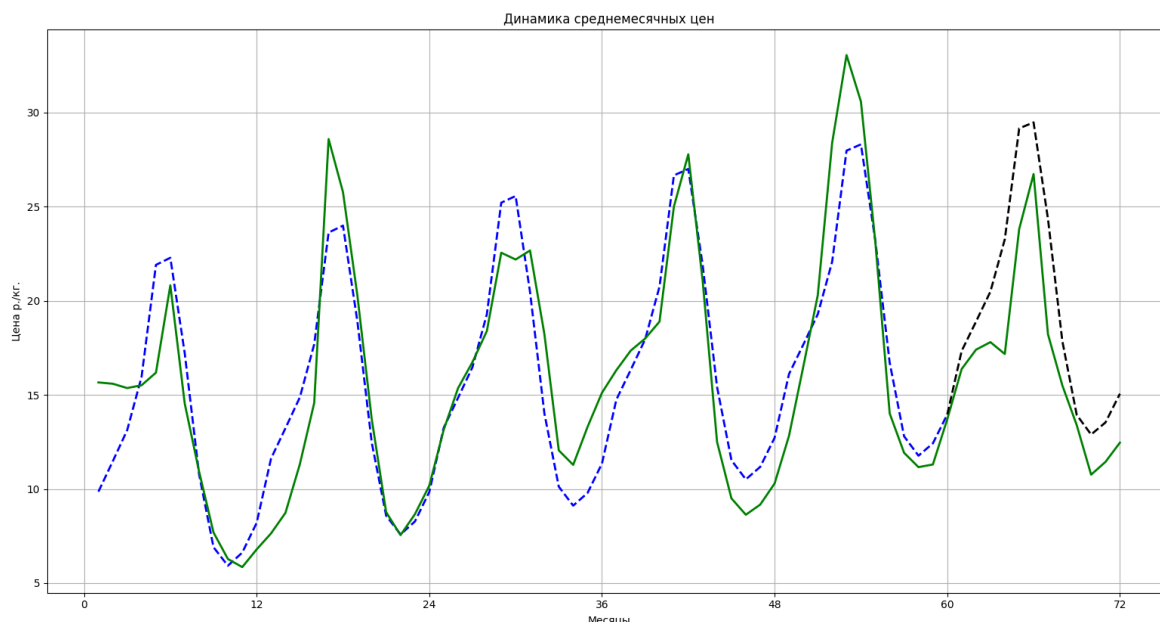


Рисунок 1 - Прогноз модели при $\lambda=0$ и фактические данные

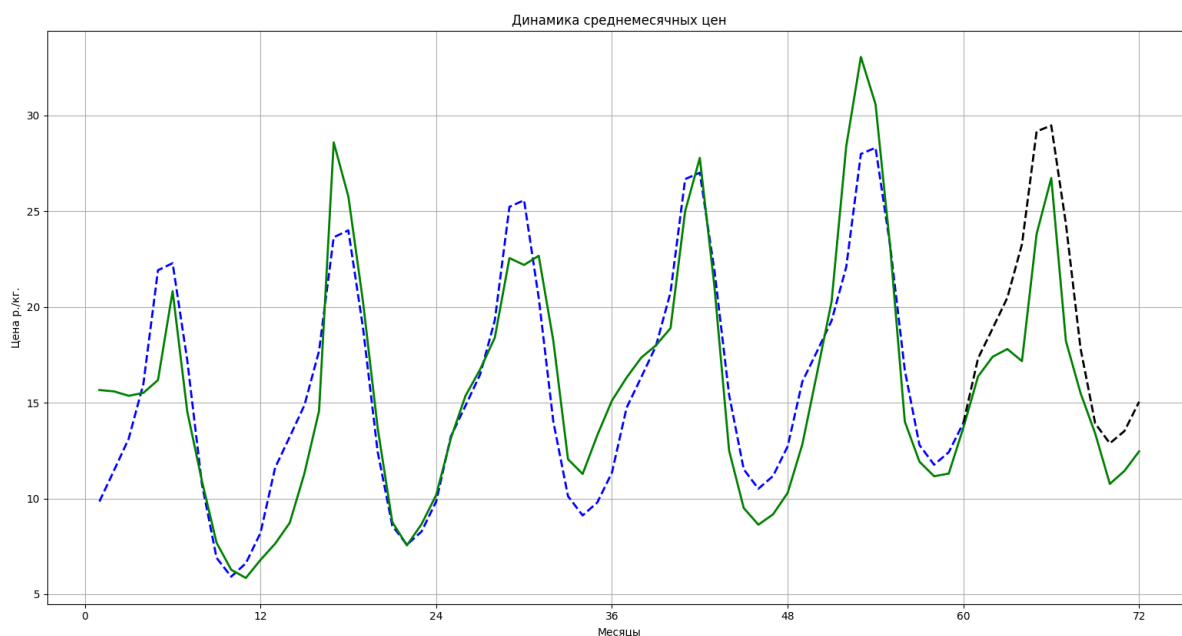


Рисунок 2 - Прогноз модели при $\lambda \approx 0,109$ и фактические данные

Анализ представленных графиков показывает, что различия между моделями при $\lambda \approx 0,109$ и $\lambda = 0$ носят умеренный характер. В обоих случаях трендовая компонента сохраняет плавную восходящую динамику, а сезонные колебания воспроизводят характерную внутригодовую структуру.

Использование экспоненциального взвешивания приводит к незначительному уточнению параметров модели за счёт большего учёта последних наблюдений, однако форма прогностической траектории остаётся близкой к результатам равновесной оценки.

Сравнение среднеквадратической ошибки на обучающем интервале показало минимальное значение $MSE \approx 24,759$ при $\lambda \approx 0,109$. Это свидетельствует о том, что умеренное взвешивание действительно позволяет незначительно повысить точность аппроксимации. Вместе с тем близость прогнозных значений при $\lambda \approx 0,109$ и $\lambda = 0$ указывает на относительную устойчивость структуры временного ряда и отсутствие выраженных структурных сдвигов в рассматриваемом периоде.

5. Заключение

В ходе исследования была разработана и реализована модель декомпозиции временного ряда, предназначенная для краткосрочного прогнозирования цен на сельскохозяйственную продукцию. Модель объединяет полиномиальный тренд, гармоническую сезонную компоненту и механизм экспоненциального взвешивания наблюдений, что позволяет учитывать возможное снижение информативности более ранних данных. Подбор параметра темпа «старения» λ осуществлялся автоматически методом золотого сечения на основе минимизации среднеквадратической ошибки прогноза.

Проведённый численный эксперимент на примере цен на белокочанную капусту показал, что оптимальное значение $\lambda \approx 0,109$ обеспечивает минимальное значение ошибки аппроксимации, однако различия между моделью с экспоненциальным взвешиванием и моделью без него ($\lambda = 0$) оказываются несущественными. Это свидетельствует о стабильности трендово-сезонной структуры рассматриваемого временного ряда и сохранении информативности исторических наблюдений на протяжении всего анализируемого периода.

Таким образом, предложенная модель продемонстрировала высокую способность к описанию тренда и сезонных колебаний и может быть эффективно использована для краткосрочного прогнозирования цен. В то же время результаты исследования подтверждают, что механизм экспоненциального взвешивания не является универсальным инструментом повышения точности прогноза: его эффективность определяется спецификой конкретного товарного рынка и характером динамики временного ряда. Следовательно, параметр λ должен подбираться индивидуально для каждого объекта исследования на основе эмпирической оценки качества прогноза.

Проблема выбора даты финансового года: между исторической традицией и экономической рациональностью

Андреева А. А., магистрант БГУ

Аннотация. В статье анализируется проблема несоответствия даты начала финансового года (1 января) экономическим и сезонным циклам в ряде стран, особенно с выраженной аграрной составляющей и суровым климатом. Рассматривается историческое происхождение январского начала года как римской административной традиции. На примере опыта Индии, США, Великобритании и Таиланда показано, как выбор даты финансового года отражает адаптацию бюджетного планирования к местным климатическим, аграрным и институциональным условиям. Выявлены ключевые барьеры реформы – законодательные, технологические и институциональные издержки перехода. Делается вывод о том, что оптимальная дата финансового года должна учитывать завершение ключевых экономических циклов (сбор урожая, завершение строительного сезона), а не следовать глобальному календарному стандарту без адаптации к условиям отдельно взятого государства.

Ключевые слова. Календарная система. Начало финансового года. Сезонные колебания. Аграрный цикл.

1. Введение

Время – фундаментальная категория, определяющая ритм человеческой жизни. Его измерение осуществляется в том числе через календарные системы, которые исторически формировались под влиянием астрономических циклов, религиозных традиций и административных потребностей [1-8]. Современный григорианский календарь, ставший глобальным стандартом, представляет собой продукт длительной эволюции, в которой победила не математическая совершенность, а историческая традиция.

Фундаментальная проблема, анализируемая в данной статье, заключается в следующем: дата 1 января как начало финансового года исторически обусловлена римскими административными традициями, а не экономической или астрономической необходимостью. В странах с выраженной сезонностью

экономической активности (зависимостью сельского хозяйства от климата, зимним спадом строительства) бюджетное планирование, начинающееся 1 января, осуществляется до завершения ключевых экономических циклов предыдущего года. Это приводит к принятию финансовых решений на основе неполных данных об урожае, налоговых поступлениях и реальных остатках бюджетных средств после зимнего периода.

Цель статьи – проследить историческую эволюцию календарных систем, выявить причины закрепления 1 января как начала года, проанализировать международный опыт адаптации финансового года к экономическим циклам и определить условия, при которых пересмотр даты финансового года может быть экономически оправдан.

2. Естественные измерители времени и проблема несоизмеримости

Основой календарного счёта служат три фундаментальных астрономических цикла: суточный (вращение Земли вокруг оси), месячный (обращение Луны вокруг Земли) и годовой (орбитальное движение Земли вокруг Солнца) [7-9]. Однако эти циклы не укладываются друг в друга целое число раз:

- Тропический год (основа сезонного цикла) $\approx 365,242190$ средних солнечных суток;
- Синодический месяц (цикл лунных фаз) $\approx 29,530589$ суток;
- В тропическом году содержится $\approx 12,36827$ синодических месяцев.

Эта арифметическая нестыковка стала «перводвигателем» всей календарной истории, заставляя цивилизации изобретать всё более сложные решения для синхронизации календаря с природными ритмами.

1. Эволюция календарных систем: от лунных к солнечным

3.1. Лунные календари

Самые древние календари, известные по памятникам палеолита, были чисто лунными, отражая наиболее наглядный цикл – смену фаз Луны.

Исламский календарь (Хиджра), введённый в VII веке н.э., сохранил эту архаичную модель: 12 месяцев по 29 или 30 дней, год = 354 или 355 дней (~11 дней короче тропического года). Главный недостаток – сезонный дрейф: календарные даты со временем сдвигаются относительно времён года, что делает систему непригодной для земледелия и бюджетного планирования.

3.2. Лунно-солнечные календари

Возникли как компромисс для аграрных цивилизаций. Цель – сохранить лунный месяц, но «привязать» его к солнечному году путём периодической вставки 13-го дополнительного месяца. Вавилоняне (с VII века до н.э.) применяли эмпирически регулируемый лунно-солнечный календарь, а иудейский календарь (около 359 г. н.э.) закрепил 19-летний Метонов цикл с 7 високосными годами. Китайская система добавила уникальную сложность: високосный месяц вставляется там, где отсутствует «средний» солнечный термин (ци). Общий недостаток – сложность, делавшая системы непригодными для унификации и международного взаимодействия.

3.3. Солнечные календари

Представляют радикальное упрощение: полный отказ от лунного цикла ради абсолютной стабильности сезонов. Египетский календарь (365 дней без високосных) был удобен для администрирования, но «уплывал» по сезонам на 1 день за 4 года. Юлианский календарь (45 г. до н.э.), разработанный александрийским астрономом Созигеном по поручению Юлия Цезаря, ввёл високосный день каждые 4 года (средняя длина года = 365,25 дня). Григорианский календарь (1582 г.), реформированный папой Григорием XIII на основе расчётов Луиджи Лилио и Кристофера Клавия, уточнил правило високосов (год, кратный 4 – високосный; кратный 100 – нет; кратный 400 – снова високосный), достигнув точности 1 день за ~3300 лет.

4. Историческое происхождение 1 января как начала года

Дата 1 января восходит к Древнему Риму. Первоначально римский год начинался в марте, но с 153 г. до н.э., с момента вступления в должность консулов 1 января, начало года было перенесено на эту дату по чисто административным соображениям. Январь был посвящён Янусу – двуликому богу переходов и начал, символизм которого соответствовал идее нового старта.

В Средние века в разных странах год начинался по-разному: 1 сентября (Византия), 25 марта (Англия, день Благовещения), 25 декабря (некоторые европейские регионы). Григорианская реформа 1582 года официально закрепила 1 января как начало года в католических странах. Россия перешла на этот порядок лишь в 1700 году по указу Петра I. Таким образом, январское начало – результат исторической традиции и административной стандартизации, а не астрономической или экономической необходимости. Тропический год начинается с весеннего равноденствия (~21 марта), что исторически служило естественной точкой отсчёта для аграрных обществ.

6. Международный опыт: адаптация финансового года к экономическим и другим циклам

5.1. Индия и британская традиция

Финансовый год Индии (1 апреля – 31 марта) был установлен британскими властями в 1867 году для синхронизации с метрополией [10]. Эта дата имеет экономическое обоснование: к апрелю завершается сбор урожая сезона «хариф» (зависимого от муссонных дождей), становятся известны реальные налоговые поступления от сельского хозяйства. В 1984 и 2016 годах в Индии обсуждалась реформа с переходом на календарный финансовый год, но от неё отказались из-за масштабных издержек на изменение законодательства и бухгалтерских систем.

5.2. Великобритания: сохранение весеннего начала

В Великобритании финансовый год начинается 6 апреля – дата, уходящая корнями в средневековую практику [11]. До 1752 года новый год начинался 25 марта (день Благовещения), что соответствовало завершению аграрного цикла. При переходе на григорианский календарь в 1752 году (с вычитанием 11 дней) правительство сохранило продолжительность финансового года в 365 дней, перенеся его начало на 5 апреля, а затем - на 6 апреля (после коррекции 1800 года). Эта система сохраняется благодаря глубокой интеграции в налоговую и бухгалтерскую инфраструктуру.

5.3. США: адаптация к институциональным ограничениям

Финансовый год США начинается 1 октября – результат двух административных реформ. Первоначально он совпадал с календарным годом

(1 января), но в 1842 году был перенесён на 1 июля из-за нехватки времени у Конгресса на утверждение бюджета. К середине XX века система вновь оказалась неадекватной усложнившемуся бюджетному процессу, и в 1974 году Закон о бюджете Конгресса перенёс начало финансового года на 1 октября, предоставив Конгрессу дополнительные три месяца для работы над бюджетом.

5.4. Таиланд: привязка к муссонному циклу

В Таиланде финансовый год начинается 1 октября, что соответствует завершению сезона дождей и основных сельскохозяйственных работ (посев и рост риса) [12]. К этому времени становится возможной оценка ожидаемых доходов от урожая, что позволяет скорректировать бюджетные ассигнования на основе реальных налоговых поступлений. Такой подход контрастирует с январским началом, при котором бюджет формируется в разгар сухого сезона, когда экономическая активность в сельской местности минимальна.

6. Сезонные колебания в России и проблема даты начала финансового года

Россия представляет собой яркий пример страны с резко выраженной сезонностью экономической активности:

Аграрный цикл. Сельское хозяйство России характеризуется чёткой сезонностью: посевная кампания приходится на апрель-май, уборка урожая – на август-октябрь. Ключевые налоговые поступления от аграрного сектора формируются в третьем и четвёртом кварталах. При январском начале финансового года бюджет планируется до завершения уборочной кампании.

Строительный и ремонтный цикл. В регионах с холодным климатом основной объём строительных и ремонтных работ приходится на апрель–октябрь. Зимние месяцы (декабрь–февраль) характеризуются резким снижением строительной активности. К весне становится понятно, остались ли у регионов финансовые и материальные ресурсы после зимнего сезона. Однако при январском начале финансового года бюджетные ассигнования на весенне-летние работы принимаются «вслепую».

Зимние расходы. Зима в России – период повышенных расходов на отопление, снегоуборку, логистику. К марту-апрелю завершается фаза

максимальных зимних издержек, и становится возможной объективная оценка остатков бюджетных средств. Начало финансового года в январе вынуждает планировать бюджет в разгар зимних расходов, когда реальная фискальная ситуация ещё неясна.

Таким образом, январское начало финансового года в России нарушает естественную связь между бюджетным циклом и природно-экономическими ритмами: бюджетные решения принимаются до завершения фискального сезона и без учёта зимних расходов.

7. Барьеры реформы даты финансового года

Несмотря на потенциальные преимущества, изменение даты финансового года сталкивается с существенными барьерами:

- **Законодательные издержки:** требуется внесение изменений в сотни законов, регулирующих налогообложение, бухгалтерский учёт, договорные отношения.

- **Технологическая перестройка:** все компании и государственные учреждения должны модернизировать свои системы в соответствии с изменениями бухгалтерских и налоговых систем.

- **Переходный период:** возможен временный хаос в отчётности и бюджетном процессе, искажающий экономические показатели.

- **Лишение глобальной синхронизации:** большинство стран используют календарный финансовый год, что упрощает международное сопоставление данных и консолидацию отчётности транснациональных корпораций.

Эти издержки объясняют инерцию сохранения исторически сложившихся дат.

8. Заключение

Анализ исторической эволюции календарных систем и международного опыта финансового планирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Выбор даты начала финансового года – это вопрос адаптации государственного управления к природно-экономическим реалиям страны. Дата 1 января исторически обусловлена римскими административными традициями и последующей глобальной стандартизацией, но не отражает экономических циклов в странах с выраженной сезонностью.

2. Григорианский календарь, ставший мировым стандартом, закрепился благодаря исторической инерции и политической экспансии, а не математической совершенности. Его структурные недостатки (неравная длина месяцев, произвольное начало года относительно природных циклов) сохраняются до сих пор.

3. Международный опыт демонстрирует, что оптимальная дата финансового года должна:

- следовать за завершением ключевых экономических циклов (сбор урожая, завершение строительного сезона);
- обеспечивать доступ к полным данным о налоговых поступлениях и реальных остатках бюджетных средств;
- учитывать климатические особенности региона.

4. Переход к новой дате экономически оправдан только при условии, что ожидаемый прирост качества бюджетного планирования превысит совокупные издержки реформы – законодательные, технологические и институциональные.

Таким образом, проблема выбора даты финансового года остаётся актуальной для стран, где сезонные колебания существенно влияют на фискальные потоки. Её решение требует не формального переноса даты, а комплексной оценки экономической эффективности реформы с учётом специфики национальной экономики и историко-институционального контекста.

Замечания редактора

Длительное время в истории человечества календари создавались в основном под влиянием задач измерения времени по естественным природным (лунным, солнечным) циклам. Изначально люди имели очень тесную связь с циклическими природными явлениями. Другим источником формирования календарей стали религиозные системы. И поныне имеются особые календари иудейской, вариантов христианских, мусульманских религий, буддийский календарь, календари зороастристов, бахаистов, кришнаитов. Сложилась длительная история формирования календарных систем. Используемый ныне в качестве мирового григорианский календарь сформировался под действием календарных систем греции, рима, египта, а также чисто случайных факторов и событий, что отражено в представленной статье. Этот календарь имеет ряд известных негативных особенностей. К ним относится разное число календарных и «рабочих» дней в отдельных кварталах и в отдельных месяцах года, непродуманность даты начала года и, соответственно, дат начала используемых подпериодов года.

Только в 50-х годах прошлого века в рамках Организации Объединенных Наций начал рассматриваться вопрос об формировании продуманного мирового календаря. Можно утверждать, что этот вопрос перестал рассматриваться в ООН в 60-х годах временно, в силу неконструктивной позиции некоторых стран. Вместе с тем, должно быть вполне очевидно, что к задаче выбора лучшего календаря человечество и отдельные страны будет возвращаться. В этой связи очень полезно изучать историю календарных систем, подходов и идей использовавшихся при формировании календарей. Можно отметить, что в истории человечества уже были попытки формирования календарей на рациональной, научной основе. К таким календарям относится персидский, созданный (уточненный) группой ученых во главе с Омаром Хаямом. Этот календарь ныне используется как альтернативный вариант мусульманского календаря. К таким научно продуманным вариантам относится и календарь Великой французской революции (который, кстати, вводился еще раз уже в дни Парижской коммуны).

Относительно частной проблемой является выбор даты начала финансового (налогового, бюджетного) года. Поскольку эта задача из сферы экономики, то решаться она должна чисто как экономическая проблема. При этом может сохраняться в стране общепринятый в качестве «мирового» григорианский календарь. Можно отметить, что в нашей стране с 1921 по 1929 год экономический (плановый, налоговый бюджетный, отчетный) начинался с 1 октября. И в этот период были самые высокие темпы экономического роста в стране. В книге Раймонда Хатчинга [14] посвященной изучению сезонных

колебаний в советской промышленности отмечалось что эти сезонные колебания формируются под воздействием двух групп факторов – сезонных климатических измерений (особенно сильно действующих в нашей стране) и периодических воздействий на активизацию производственной деятельности с годовой цикличностью факторов связанных с периодичностью принятия годовых планов и формирования отчетов по их выполнению. Ныне, такими факторами являются годовая периодичность сбора налогов и формирования государственного и региональных бюджетов, принятие хозяйственных решений по реализации сезонных видов деятельности.

Сезонные воздействия природных факторов и периодические внутригодовые воздействия действующего экономического механизма в стране по разному сочетаются в зависимости от даты начала экономического года. Это сказывается на затраты по регулированию сезонных явлений в российской экономике (мероприятия по подготовке к зиме, создание сезонных запасов котельно-печного и моторного топлива, и многие другие мероприятия). Очевидно, также что выбор даты начала хозяйственного года должен сказаться на итоговую годовую эффективность производства. Обе указанные составляющие последствий от выбора даты начала хозяйственного года могут и должны стать предметом дальнейших исследований автора представляемой здесь статьи.

Оба указанные выше аспекта экономических последствий выбора даты начала хозяйственного года были отражены в моих публикациях[1,2], которые послужили основанием для предложения от аппарата ЦМ СССР подготовить проект решения о переносе даты начала планового года на 1 октября с детальным экономическим обоснованием. Начавшаяся «перестройка» и последующий развал СССР не позволили реализовать это начинание. Конечно, к разработке и реализации этой идеи полезно вернуться.

К указанным двум можно добавить еще один третий аспект, требующий изучения и количественной оценки при выборе даты начала экономического года – эффективность принимаемых решений (планируемых действий, выделяемых денежных средств на их реализацию) в зависимости от соотношения даты принятия и даты начала реализации решения. Этот аспект также, можно надеяться, будет предметом дальнейших исследований автора представляемой здесь статьи.

Литература

1. Зоркальцев В. И. Когда лучше начинать хозяйственный год / В. И. Зоркальцев // Управление экономическими системами. – Новосибирск : ИЭОПП СО АН СССР. – 1980. – С. 102-120.
2. Зоркальцев В. И. Начало хозяйственного года / В. И. Зоркальцев // ЭКО. – 1981. – № 9.
3. Зоркальцев В. И. Проблема выбора наилучшей даты начала хозяйственного года/ В. И. Зоркальцев. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2016. – 32 с. – (Препринт / ИСЭМ СО РАН; № 102).
4. Календари в культуре народов мира. – М. : Наука, 1993. – 272 с.
5. Клименшин И. А. Календари и хронология / А. И. Клименшин. – М.: Наука, 1985. – 478 с.
6. Селешников С. Г. История календаря и хронология / С. Г. Селешников. – М. : Наука, 1997. – 153 с.
7. Хренов Л. С. Время и календарь/ Л. С. Хренов, И. Я. Голуб. – М. : Наука, 1990. – 126 с.
8. Шур Я. И. Время и календарь/ Я. И. Шур // Детская энциклопедия. – М. : Просвещение, 1964. – С. 145-158.
9. Михайлов А.А. Земля и ее вращение. – М. : Наука, 1984.
10. Ministry of Finance, Government of India. Report of the Committee on Review of Financial Year. – New Delhi, 1984.
11. Congressional Budget and Impoundment Control Act of 1974, Pub.L. 93–344, 88 Stat.
12. Budget Procedure Act, B.E. 2502 (1959), Kingdom of Thailand.
13. Зоркальцев В.И., Мокрый И.В. Календарь и его реформа // Вестник Байкальского государственного университета. – 2024. – № 4. – С. 149–162. – DOI: 10.17150/2500-2759.2024.4.149.
14. Raymond Hutching Seasonal influences in Soviet industry. London, New-York: Oxford Universiti Press, 1971.

Преимущества использования дирижаблей при транспортировке в Иркутской области

Авдеев А.А. магистрант БГУ

Аннотация. В статье рассматриваются преимущества дирижаблей для транспортировки в Иркутской области и их потенциал в будущем, несмотря на исторические аварии, связанные с использованием горючих газов и материалами низкого качества. Обсуждаются перспективы использования дирижаблей для транспортировки грузов в удаленных от транспортных магистралей регионов Иркутской области, в том числе на побережье озера Байкал. Рассчитывается (ориентировочная) цена транспортировки для сравнения с другими видами транспорта.

Ключевые слова. Дирижабли. Сравнительный анализ вариантов транспортировка грузов.

1. Введение

Иркутская область — огромный и уникальный регион России площадью около 767 тысяч кв. км, расположенный в Восточной Сибири. Это один из крупнейших субъектов РФ с богатой природой, включающий тайгу, горы, озёра и реки. Значительная часть территории удалена от крупных транспортных магистралей, что усложняет доставку грузов и людей. Климат региона — суровый, зимы долги и холодные, летом возможны перепады температуры и природные катаклизмы.

Ольхон — крупнейший остров в Байкале, протяжённостью около 71 км и шириной до 12 км. Является важной природоохранной зоной, национальным парком и центром туризма. Исторически и культурно значимый, с многочисленными памятниками и этнографическими объектами.

Внутренние транспортные пути — ограничены и сложны, особенно в зимний период: отсутствует полноценная инфраструктура. Традиционные виды транспорта («автомобили», «самолеты», «лодки») могут сталкиваться с серьёзными ограничениями. В таких условиях перспективным является использование дирижаблей — воздушных судов с низким уровнем воздействия на окружающую среду и высокой мобильностью.

В данном докладе будут рассмотрены перспективы транспортировки дирижаблем, а также преимущества перед другими видами.

2. Актуальность

Для обеспечения жизни и развития региона необходимо устойчивое и своевременное снабжение. Традиционные транспортные средства — дороги, водный транспорт и авиасообщение — сталкиваются с высокими затратами, сезонными и природными ограничениями. В таких условиях применение инновационных решений, таких как дирижабли, может значительно повысить эффективность логистики.

Дирижабль — это воздушный судно с управляемым полетом, основанный на принципе подъёма за счёт газов, легче воздуха. Внутри корпуса (камеры или оболочка) находится газ — обычно гелий или водород (смесь водорода с метаном) — который намного легче воздуха, что обеспечивает поднятие судна.

Закон Архимеда: подъемная сила равна весу вытесненного воздуха минус вес самого дирижабля с грузами.

Для подъёма и управления движением используются двигатели и рулевые поверхности:

- Двигатели создают тягу для движения вперёд;
- Руль и горизонтальные стабилизаторы позволяют управлять курсом и наклоном в горизонтальной плоскости, то есть обеспечивают управление турбулентностью и направлением полёта.

Вертикальный взлёт и посадка — благодаря легкому газу внутри оболочки, дирижабль может начать полёт практически с места и приземлиться в узком или труднодоступном месте. В отличие от самолётов, дирижабль не требует взлётной полосы и может зависать в воздухе, что делает его особенно удобным для доставки грузов в удалённые районы.

3. Трагедии с дирижаблями: причины и последствия

Причины.

Пожары внутри и снаружи оболочки:

— Водород, используемый в ранних моделях, был крайне воспламеняемым и вызывал взрывы и пожары.

— Начиная с конца 19-го века появляются случаи возгораний из-за перегрева или молний, искр.

Проблемы с конструкцией и материалами:

— Ненадёжные материалы оболочки и несоответствия в управлении.

— Прорывы, утечки газа и снижение подъёма.

Метеоусловия и слабая навигация:

— Штормы, сильный ветер или плохая видимость затрудняли управление и приводили к крушениям.

Ошибки пилотирования и технические неисправности:

— Недостаточный опыт экипажа или технические дефекты.

Известные трагедии.

Гибель "Гинденбурга" (1937):

— Самая известная авария дирижабля; произошло возгорание водорода и метана при посадке.

— Погибло 36 человек из 97.

— В результате был прекращён массовый использование водородных дирижаблей в коммерческих целях.

Катастрофа "R-101" (1930):

— Британский дирижабль потерпел катастрофу из-за технической неисправности, что привело к гибели 48 человек.

Последствия трагедий.

Потеря доверия к дирижаблям:

— Снижение интереса к эксплуатации, особенно коммерческой.

— Быстрый отказ от использования водородных газов в пользу безопасных газов, например, гелия.

— Развитие авиации, вертолето- и самолетостроения.

— В 1930-х годах дирижабли практически вышли из массового использования.

Улучшение технологий [1,2].

— Усиление стандартов безопасности, использование безопасных газов. Использование гелия вместо водорода.

— Гелий — инертный и безопасный газ, который заменил водород в большинстве современных дирижаблей благодаря своей высокой безопасности. Гелий легче воздуха и не горит, что значительно уменьшает риск пожара.

— В прошлом использовался водород, который легко воспламенялся, вызывая известные трагедии. Также использовалась смесь водорода с метаном, однако была тоже горючей.

Современные материалы и конструкции.

— Оболочки делаются из прочных, лёгких и негорючих материалов, что снижает риск прорыва и возгорания.

— Используются современные системы армирования и плотности, обеспечивающие крепкость.

Современные системы безопасности и управления.

— *Автоматизированные* системы контроля - системы, которые позволяют в реальном времени следить за состоянием дирижабля, его техническими параметрами, уровнем газа, состоянием двигателей, датчиками погоды и навигации. *Примеры:*

- Автоматическая система контроля давления и температуры газа внутри оболочки.
- Системы мониторинга технического состояния и износостойкости конструкций.
- GPS-навигация и автоматическая система курсового управления.
- Системы автоматического слежения за погодными условиями и коррекции полета.

Системы пожаротушения внутри оболочки - системы, предназначенные для быстрого и эффективного тушения очагов пожара внутри дирижабля, чтобы предотвратить распространение огня и защитить пассажиров и экипаж. *Примеры:*

- Автоматические спринклеры или распылители огнетушащих веществ, активируемые при обнаружении дыма или температуры.
- Использование газовых или порошковых огнетушащих средств, которые тушат огонь без повреждения конструкции.
- Системы сигнализации о пожаре, предупреждающие экипаж и автоматические срабатывающие системы.

4, Современные дирижабли: конструкции, материалы и перспективы

Используемые газы:

Герметичные гелевые оболочки, наполненные гелием.

Конструктивные материалы:

Каркас обычно делается из лёгких и прочных композитных материалов, таких как углепластик, карбоновое волокно или алюминиевые сплавы. Эти материалы обеспечивают прочность и легкость.

Оболочка делается из протестированных синтетических тканей (полиэстер, капрон, смесь с неопреновыми покрытиями). Предусмотрена защита от ультрафиолетового излучения и механических повреждений.

Оболочка покрыта специально разработанными слоями, обеспечивающими герметичность и устойчивость к погодным условиям.

Высокая пропускная способность влаги и ультрафиолета — чтобы сохранить гелиум и долговечность. Некоторые дирижабли оборудованы защитными покрытиями против ультрафиолета и погодных условий.

Конструкция и дизайн:

Современные дирижабли — это цилиндрические или летающие диски (форма диска), более аэродинамичные.

Внутри — отсеки, содержащие гелий, и механизмы управления.

Оснащены гидравлическими или электромоторами для управления подъёмной силой, а также гермометрами, барометрами, системами мониторинга.

4. Новые модели дирижаблей и их краткая характеристика

Приведем краткие характеристики в настоящее время разрабатываемых и используемых дирижаблей на основе литературных источников [3-5].

AirLads — "Cargolifter" (в разработке).

Тип: грузовой дирижабль

Особенности: крупная грузовая платформа с возможностью перевозки тяжелых и объемных грузов в труднодоступные регионы.

Материалы: композитные материалы, герметичная гелиевая оболочка.

Перспективы: экологичная альтернатива авиадоставке, используется для логистики в арктических и горных районах.

Hybrid Air Vehicles (HAV) — "Airlander 10".

Тип: гибридный дирижабль-индустрия для пассажирских и грузовых перевозок

Размер: около 30 м в длину, грузоподъемность примерно 4 тонны

Особенности: сочетает аэростатические возможности с крыльями, обеспечивает медленный, стабильный полет.

Использование: туристические полеты, мониторинг окружающей среды, рекламные кампании.

Преимущества: низкий уровень шума, низкое потребление энергии.

Goodyear — "Wingfoot Two" .

Тип: рекламный и развлекательный дирижабль

Особенности: модернизированные модели с улучшенной аэродинамикой и системами управления.

Использование: участие в фестивалях, рекламе, туристические прогулки.

Материалы: современные полимеры и гелийосодержащие оболочки.

Mitsubishi "Super Giant".

Тип: большой грузовой дирижабль

Особенности: предполагается использование новых легких материалов, более эффективных газов и систем управления.

Перспективы: перевозка тяжелых грузов в кратчайшие сроки, экологичный и дешевый транспорт.

ЛЧ-2 "Cargolifter".

Тип: грузовой дирижабль с электродвигателями

Особенности: оснащен солнечными батареями и электромоторами, предназначен для перевозки грузов в удаленные регионы.

Преимущества: экологическая безопасность, низкое потребление энергии.

6. Сравнительный анализ перевозки грузов от Иркутска до Ольхонского района на побережье озера Байкал.

Ольхонский район Иркутской области включает остров Ольхон и территорию на побережье озера Байкал вокруг пролива Малое море. Является территорией активного развития туризма и отдыха на Байкале. Активно посещается жителями Иркутской области, российскими и иностранными туристами.

Расстояние от Иркутска до Ольхонского района — примерно 300 км, Осуществляются массовые перевозки строительных грузов, топлива, продуктов питания и других товаров, а также нарастающего потока отдыхающих в Ольхонском районе.

Рассмотрим перевозку грузов массой от 20 до 100 тонн.

Время в пути: 2–14 часов, зависит от вида транспорта и скорости.

Сравним возможные варианты транспортировки.

6.1. Водный транспорт (только в летнее время)

Учитываются две составляющие затрат: $C_{вод} = C_{аренда} + C_{топл}$

Затраты на моторное топливо на один рейс положим равными $C_{топл} = 72\$$.

Аренду судна на один рейс положим равной 500 \$.

Общие затраты на один рейс: $C_{вод} = 500 + 72 = 572\$$.

Общие затраты: 572 \$ за рейс

Предположим, средний груз — 50 тонн

Стоимость перевозки 1 тонны: $572\$/50t \approx 11.44\$$

Если груз 20 тонн:

$572\$/20t \approx 28.6\$$

Плюсы и минусы водного транспорта.

- + Низкая стоимость судового топлива.
- + Экологичный,
- Зависимость от погоды и навигационных условий,
- Не везде есть подходящая инфраструктура (причалное хозяйство).

6.2. Автомобильный транспорт

Расчет затрат на перевозку крупнотонажным грузовиком.

- Топливо: $C_{топл} = (R_{авто} \times S) / 100 \times C_f$, где $R_{авто} \approx 30$ л/100 км;
 $C_{топл} = (30 \times 300) / 100 \times 1.2 = 90 \times 1.2 = 108\$$;
- Аренда, тариф: $C_{транспорт} \approx 1500\$$ за рейс;
- Общие затраты: $C_{колес} = 1500 + 108 = 1608\$$ за рейс.

Предположим, что груз — 50 тонн

Стоимость на 1 тонну: $1608\$/50t \approx 32.16\%$

Для 20 тонн: $1608\$/20t = 80.4\%$

Плюсы и минусы транспорта:

- + Быстро (1-2 дня);
- + Хорошая инфраструктура;
- Большие затраты на топливо;
- Некоторая зависимость (намного меньшая, чем у водного транспорта) от дорожных условий и сезонности. Отсутствие в некоторых местах региона дорог.

6.3. Воздушный транспорт

6.3.1. Вертолет

- Стоимость аренды: примерно 3000-5000 \$ за час полета.
- Время: 1-2 часа на маршрут.
- Топливо: около 150 л/час.

Стопл, верт = $150 \times 1.5 \text{ час} \times 1.2 = 270\%$.

Саренда ≈ 4000 \$ за рейс.

- Общие затраты: *Сверт $\approx 4000 + 270 = 4270\%$ за рейс.*

Обычно грузоподъемность — до 2 тонн, возьмем такую для расчетов. На 20 и 50 тонн не считаем. Стоимость на 1 тонну: $4270\$/2t = 2135\%$.

6.3.2. Грузовой самолет

- Стоимость аренды: около 10 000 \$ за рейс
- Топливо: примерно 300 л/час, время рейса 1-1.5 часа

Стопл, самолет = $300 \times 1.5 \times 1.2 = 540\%$

Общие затраты: $10000 + 540 = 10540\%$ за рейс

Обычно грузоподъемность — около 10 тонн, поэтому стоимость 1 тонны:

$10540\$/10t = 1054\%$

Плюсы и минусы воздушного транспорта.

- + Высокая скорость.
- + Можно доставлять в труднодоступные районы, при наличии аэродрома
- Высокая стоимость.
- Ограничения по весу и объему.
- Зависимость от погодных условий.

6.4.Дирижабль

Расчет затрат

- Стоимость приобретения/аренды: допустим, 1 000 000 \$ (амортизация за 10 лет при 20 рейсах в месяц):

$$\text{Самортизация}_{\text{рейс}} = (1000000/10\text{лет}) \times (1/(12 \times 20)) \approx 416\$$$

- Топливо на рейс:

$$\text{Стопл} \approx 10\text{л} \times 1.2 = 12\$$$

- Общие затраты на рейс:

$$\text{Сдирижабль} \approx 416 + 12 = 428\$$$

(при условии, что эксплуатационные расходы низкие и есть возможность использовать один и тот же дирижабль многократно)

Общие затраты: 428 \$ за рейс

Грузоподъемность — до 10-20 тонн, возьмем 10 тонн:

Затраты для перевозки на одну тонну грузов: $428\$/10\text{т} = 42.8\$$ для 10 т. и 21,4\$ для 20т.

5. Сравнительный анализ вариантов перевозки грузов

В таблице 1 представлены в обобщенном виде приведенные выше оценки затрат на транспортировку грузов из г.Иркутска до Ольхонского

района. Согласно этим данным наименьшие затраты на перевозку одной тонны грузов имеет водный транспорт. Но это сезонный транспорт, которым можно пользоваться только в период 4 месяцев в году. Эти транспортом могут доставляться грузы только в ограниченное число пунктов на побережье озера Байкал. Он нуждается в дальнейшей «довозки» или «развозки» грузов от портов до пункта назначения грузовым автомобильным транспортом. Все это сильно ухудшает экономическую эффективность использования водного транспорта.

Таблица 1. Затраты на перевозку грузов от Иркутска до Ольхонского района разными видами транспорта

Вариант	Общие затраты на рейс	Стоимость за 1 т, \$	Основные плюсы/минусы
Водный транспорт	~572 \$	11,44	Медленный, экологичный, хорош для крупногабарита, однако является сезонным
Автомобильный транспорт	~1608 \$	32,16	Быстрый, необходима инфраструктура, сезонная доставка на остров
Вертолет	~4270 \$	2135	Быстрый, доступный, очень дорогой
Самолет (грузовой)	~10 540 \$	1054	Быстрый, дорогостоящий
Дирижабль	~428 \$	42,8-21,4	Экономичный, быстрый, подходит для регулярных рейсов

Для транспортировки грузов по рассматриваемому маршруту использование дирижабля выглядит эффективным по затратам. К плюсам

использования дирижабля можно отнести возможность доставки крупногабаритного оборудования в любую точку без демонтажа.

7. Экологические преимущества использования дирижабля.

Использование дирижабля в транспортных перевозках обладает рядом значимых экологических преимуществ, которые делают его привлекательным средством для грузоперевозок, особенно в условиях экологического регулирования и необходимости снижения негативного воздействия на окружающую среду:

- Низкий уровень выбросов вредных веществ.

Дирижабли работают на электроэнергии или на топливе с низким уровнем выбросов углекислого газа (CO_2), оксидов азота (NO_x) и других загрязняющих веществ по сравнению с традиционными воздушными судами и автотранспортом.

- Минимальное шумовое воздействие.

Работа дирижабля сопровождается значительно меньшим шумом, что особенно важно при перевозке грузов в экологически чувствительных зонах, населенных пунктах и природных территориях.

- Отсутствие необходимости в сложной, дорогой инфраструктуре.

Дирижабли не требуют сложных аэродромных сооружений и дорогостоящих дорог, что снижает негативное влияние на ландшафт и уменьшает экологический след строительства и эксплуатации инфраструктуры.

- Возможность работы в труднодоступных районах.

Благодаря высокой маневренности и низкому уровню шума, дирижабли могут осуществлять перевозки без необходимости прокладывать новые дороги или инфраструктуру, что уменьшает экологические разрушения природных экосистем.

.

- Возможность развития туристической деятельности. Путешествие на дирижаблях над Байкалом может привлечь миллионы туристов

Выводы

Использование дирижабля как средства транспортировки в Иркутской области обладает рядом преимуществ. Благодаря низким затратам на топливо, эксплуатационные расходы снижаются по сравнению с авиационным или автотранспортом. Отсутствие необходимости в крупной инфраструктуре и возможности осуществлять перевозки в труднодоступных районах позволяют сократить капитальные вложения и операционные расходы.

Дирижабли также позволяют снизить негативное воздействие на окружающую среду, благодаря низким выбросам вредных веществ, минимальному шумовому воздействию, отсутствию необходимости в сложной инфраструктуре и возможности работы в труднодоступных районах, дирижабли способствуют сохранению природных экосистем и снижению углеродного следа.

Можно также отметить перспективную роль в повышении привлекательности туристической деятельности. Путешествие на дирижаблях над Байкалом может привлечь миллионы туристов.

Литература

1. Белов, А. В. (2018). Экологические аспекты использования дирижаблей в транспортной системе. //Журнал «Транспорт и логистика», 5(2), с. 45-52.
2. Иванов, П. Ю., & Смирнова, Е. А. (2020). Экономическая эффективность современных дирижаблей. //Вестник транспортных технологий, 12(3), с. 78-85.
3. Международная ассоциация дирижаблестроителей. (2021). Отчёт о состоянии и перспективах развития дирижабельных технологий. Москва: МАД.
4. Петров, В. К. Экологические преимущества воздушных судов с низким уровнем выбросов. //Экология и транспорт, 2019, № 1, с. 33-40.
5. Smith, J., & Lee, R. Sustainable Aviation: The Role of Airships in Modern Logistics. // Journal of Environmental Economics, 2022, №4, с. 112-125.

