



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Прикладной и системной экологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
бакалавра

На тему «Оценка устойчивости водных объектов к изменению параметров и режимов»

Исполнитель Одиноква Ксения Дмитриевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)  
Примак Екатерина Алексеевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)  
кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Алексеев Денис Константинович  
(фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Санкт–Петербург  
2019

## Содержание

	стр.
Введение	4
Глава 1. Методологические и методические основы оценки устойчивости водных экосистем	6
1.1 Подходы к оценке устойчивости геосистем	6
1.2 Определения и понятия устойчивости экологических систем	8
1.3 Основные критерии оценки устойчивости водных экосистем	11
1.4 Методы оценки устойчивости водных экосистем	13
Глава 2. Характеристика оз. Выгозера	27
2.1 Физико-географические и гидрологические характеристики озера	27
2.2 Изменение параметров режимов в следствие антропогенной нагрузки	29
Глава 3. Результаты оценки устойчивости водных объектов к изменению естественных и антропогенных параметров режимов	39
3.1 Оценка устойчивости оз. Выгозера к изменению параметров режима на основе метода балльно-индексной оценки	39
3.2 Оценка устойчивости оз. Выгозера к изменению параметров режима на основе метода сводных показателей	41
3.3 Анализ полученных результатов	48
Заключение	56
Список использованных источников	59

## Обозначения и сокращения

ББК – Беломорско-Балтийский канал

вдхр. – водохранилище

макс. – максимальный

мин. – минимальный

МРСП – метод рандомизированных сводных показателей

МСП – метод сводных показателей

ОВ – органическое вещество

оз. – озеро

р. – река

СБО – станция биологической очистки

СЦБК – Сегежский целлюлозно-бумажный комбинат

## Введение

Вопрос об устойчивости природных и антропогенных экосистем является одним из важнейших в исследовании природных систем. В первую очередь потому, что одним из главных свойств экосистемы является устойчивое возобновление самой себя в условиях постоянно меняющейся внешней, а также и внутренней среды

На сегодняшний день влияние человека на окружающую среду настолько значительно, что можно уже наблюдать положительные и отрицательные стороны этого воздействия. Вопросы степени устойчивости геосистем к загрязнению, оценки качества поверхностных вод тесно связаны с экологическим нормированием, без которого невозможно представить управление состоянием водных объектов. Поэтому сейчас, когда пришло время справляться с последствиями антропогенного воздействия на экосистемы, как никогда актуальны понятия устойчивости и устойчивого развития.

Актуальность темы дипломной работы заключается в том, что понятие устойчивости весьма неоднозначно, следовательно, существует великое множество подходов к описанию данного понятия и исследованию этого свойства экосистемы. Но все еще нет единого, четко сформулированного метода интегральной оценки состояния и устойчивости экосистем.

Целью дипломной работы является оценка устойчивости водных объектов к изменениям параметров режимов.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие задачи:

1. рассмотреть методологические и методические основы оценки устойчивости водных экосистем;
2. дать характеристику озера по физико-географическим, гидрологическим, морфологическим признакам, а также и

изменению параметров качества воды в разные периоды существования водоема;

3. разработать интегральный показатель для оценки устойчивости водоема к изменению параметров естественного и антропогенного режимов;
4. оценить устойчивость водоема к изменению параметров режимов на основе метода балльно-индексной оценки и метода сводных показателей;
5. провести анализ полученных результатов.

Оценка устойчивости водных объектов к изменениям параметров режимов выполнена на примере оз. Выгозеро.

# Глава 1. Методологические и методические основы оценки устойчивости водных экосистем

## 1.1 Подходы к оценке устойчивости геосистем

Все подходы к изучению проблемы устойчивости геосистем целесообразно поделить на две группы. К первой отнесем все понятия устойчивости и изменчивости геосистем как основополагающего (основательного) свойства объектов реального мира в тесной связи с представлением об инвариантности системы. По В.Б. Сочаву (1978) инвариантными называют такие свойства геосистемы, которые остаются неизменными при разных динамических процессах, происходящих в геосистемах. Если в результате какого-либо внешнего воздействия инвариант остался неизменен, то говорят о возвращении геосистемы в первоначальное состояние спустя время. Если же внешнее воздействие привело к смене инварианта, то о восстановлении геосистемы говорить не приходится. Инвариантами могут быть: состояние системы, структура, способ функционирования, траектория саморазвития. В этом подходе система считается устойчивой, если любым способом сохраняет инвариант в течение времени, которое ощутимо в сравнении времени смены инварианта.

Во вторую группу подходов входят исследования устойчивости геосистем к антропогенным воздействиям различного характера. Основой подходов этой группы является определение запаса устойчивости экосистем, выявлению критериев и методов оценки устойчивости природных и природно-антропогенных экосистем к антропогенным нагрузкам. Важным положением данных подходов является то, что «при прочих неизменных условиях более продуктивная экосистема будет более устойчива к эвтрофикации, а более сапробная экосистема будет более устойчива к снижению качества воды» [7].

Аналогичным образом Светлосанов В.А. выделяет две оценки устойчивости в соответствии с двумя понятиями, характеризующими способность экосистемы реагировать на воздействие.

Для оценки устойчивости экосистем в конкретный отрезок времени к конкретному типу возмущений вводится термин «критерий устойчивости» экосистем. В основном «критерий устойчивости» будет зависеть и определяться классом конкретного возмущения.

Для количественной оценки устойчивости экосистем в конкретный период времени используется понятие «индекс устойчивости» экосистем [23]. «Индекс устойчивости» определяется как устойчивость экосистем к усреднённому воздействию возможных возмущений. Основная особенность данного подхода заключается в характеристике способности экосистемы противостоять всему многообразию действующих на нее возмущений. Также необходимо упомянуть, что «индекс устойчивости» - величина относительная, так как довольно часто ее используют для сравнения устойчивости разных экосистем к определенным возмущениям.

Также при рассмотрении подходов к оценке устойчивости водных экосистем следует упомянуть про экологическое нормирование. Экосистемные принципы нормирования вредного воздействия на элементы природной среды являются одной из важнейших частей управления состоянием природных ресурсов. Многие методологические подходы к нормированию вредного воздействия основаны на таком свойстве, как устойчивость. В соответствии с этим можно выделить также два направления в оценке устойчивости. Первое направление основано на методах нормирования отдельных показателей природных систем с их последующим суммированием по балльной системе относительно некоторых эталонов. Второе же направление основано на построении математических моделей, которые отражают механизмы существования устойчивости. С помощью этих моделей могут быть выявлены критические значения параметров устойчивости систем, при которых она становится уязвимой.

При экологическом нормировании чаще используется адаптационная составляющая устойчивости для получения количественных оценок уровня устойчивости конкретных природных систем. В тоже время в основу разработки нормативов положена математическая теория устойчивости.

## 1.2 Определения и понятия устойчивости экологических систем

Понятие «устойчивость» в экологии имеет множество значений. Поэтому в литературе используются термины, обозначающие разные категории устойчивости: стабильность, инертность, инвариантность, уязвимость, устойчивое равновесие, гомеостаз, упругая устойчивость, живучесть, самоорганизуемость, устойчивость к воздействию. Автором работы рассмотрены различные определения, тем самым отметив многообразие терминов, используемых при оценке устойчивости.

Инертность системы – способность экосистемы сохранять при внешнем воздействии исходное состояние в течение некоторого времени.

Уязвимость экосистемы – утрата экосистемой способности сохранять квазипостоянными свои свойства и параметры режимов в условиях действующих внутренних и внешних возмущений.

Устойчивость экосистемы к воздействию – способность экосистемы сохранять квазипостоянными свои свойства и параметры режимов в условиях действующих внутренних и внешних возмущений.

Стабильность – способность природной экосистемы возвращаться в прежнее состояние устойчивого равновесия после временного воздействия на нее.

В.А. Светлосанов [18] ввел понятия простой, эластичной и упругой стабильности природных экосистем. Эластичная стабильность – способность экосистемы вернуться в положение равновесия после кратковременного возмущения, если период между возмущениями меньше времени релаксации системы. Если имеется лишь одно положение равновесия, то в зависимости



от того, насколько оно устойчиво к возмущениям, говорят о просто стабильности или нестабильности природной системы.

Устойчивость по Ляпунову является самым жестким требованием глобальной устойчивости экосистемы. Устойчивость сообщества соотносится с устойчивостью некоторого положительного стационарного решения системы модельных уравнений – точка равновесия или предельный цикл, то есть с неким равновесным положением экосистемы в многомерном пространстве ее характеристик. Более подробно методика Ляпунова будет рассмотрена в этой главе ниже по тексту [16].

Устойчивость по Свирежеву (иерархическая) предполагает сохранение структуры популяции за счет стабилизирующего действия всего сообщества или экосистемы. Иными словами, любая система состоит из «фрагментов», каждый из которых в определенный момент времени может быть устойчивым, а может и нет. Но неустойчивость одного «фрагмента» может стабилизироваться другим «фрагментом», стоящим иерархически выше.

Устойчивость по Пуассону (периодическая устойчивость) предполагает, что соответствующая фазовая траектория (результат описания дифференциальными уравнениями динамики некоторой гидроэкосистемы) сколь угодно долго не покидает ограниченной области фазового пространства. Иными словами, находясь в этой области бесконечно долго, она неизбежно будет возвращаться в сколь угодно малую окрестность начальной точки. Времена возврата могут быть периодическими, квазипериодическими или представлять собой случайную последовательность [16].

Устойчивость по Лагранжу. Если сообщество сохраняет все свои виды, но не имеет равновесных состояний (т. е. решения модельных уравнений системы ограничены сверху и снизу некоторыми положительными константами), то говорят об относительной стабильности системы и оценивают устойчивость по Лагранжу.

В 1973 году Холлинг предположил, что природные системы обладают двумя свойствами: стабильностью (stability) и упругостью (resilience), термин stability в русском языке переводится и как устойчивость и как стабильность. Под упругостью экосистем понимается способность переходить под действием возмущений из одного устойчивого состояния в другое, сохраняя при этом внутренние взаимосвязи. Под стабильностью понимается способность экосистемы возвращаться в прежнее состояние устойчивого равновесия после временного воздействия на нее.

По мнению В.Ф. Шуйского наиболее эффективно использование количественных показателей, учитывающих не фиксированные значения количественных характеристик биосистем и их установленную периодичность, а степень их изменчивости за период наблюдений. В своей работе В.Ф. Шуйский упоминает о моделировании устойчивости, обосновывая преимущество этого метода тем, что мы можем работать не с ожиданием постоянства количественных характеристик, а с постоянством режима, при котором изменяются данные характеристики. По Шуйскому «наиболее обоснованной мерой устойчивости к воздействию на какую-либо биосистему является такой уровень воздействия, при котором вызываемые им изменения теряют обратимость».

В.Б. Сочава (1978) связывал понятие устойчивости с понятием инварианта в природной геосистеме. Говоря о понятии инварианта, пришедшего в географические исследования из физики, Сочава представлял некоторые свойства геосистемы, которые остаются неизменными при различных динамических процессах, проходящих в геосистемах.

По И.Н. Росновскому под устойчивостью системы понимается ее способность сохранять свои свойства и параметры режимов в условиях действующих внутренних и внешних возмущений.

А.Д. Арманд определил устойчивость как способность геосистемы вернуться в исходное состояние после возмущения. Но вместо устойчивости он использовал термин «гомеостазис», под которым подразумевал «способ

возвращаться к начальному состоянию после внешнего или внутреннего воздействия» [18].

В своей работе [14] Примак Е.А. под устойчивостью водного объекта к изменению параметров режимов понимает его способность сохранять свои свойства и параметры режимов в условиях действующих на него внешних и внутренних нагрузок. Тогда уязвимыми к изменению параметров режимов будут объекты, не способные сохранять указанные свойства на определенном временном интервале функционирования.

### 1.3 Основные критерии оценки устойчивости водных экосистем

Для выбора оптимальных критериев устойчивости изначально необходимо обозначить предъявляемые к экосистеме требования. Например, если интересуют только характеристики поступающих из экосистемы веществ, то надо оценивать устойчивость в экосистеме биогеохимического круговорота. Если цель – сохранение заповедной водной экосистемы в неизменном виде, то необходимо определять устойчивость экосистемы к сохранению числа видов организмов.

Достоверно, что устойчивость экосистемы по данной характеристике к какому-либо внешнему возмущению будет тем больше, чем большее возмущение она способна испытать без изменений этой характеристики. Для оценки степени воздействия внешнего фактора на состояние экосистемы необходимо через систему слежения гидроэкологического мониторинга получить конкретное значение репрезентативного параметра (параметров), отражающих системные свойства, до воздействия и после него. На основании этого разработана система параметров, характеризующих устойчивость водных экосистем.

Чаще всего используются количественные характеристики различных форм устойчивости, основанные на интегральных показателях обилия – биомасса, численность организмов в сообществе или биоте в целом. По

данным характеристикам можно оценить устойчивость только по степени постоянства этих количественных характеристик, воздействие же на экосистему – невозможно. Следовательно, невозможно получить и экологически обоснованных нормативов, регулировать и прогнозировать воздействия. Резистентную устойчивость к воздействию нужно оценивать по тому, насколько постоянны во времени ее исследуемые показатели. Упругая устойчивость к воздействию вообще не может быть оценена степенью постоянства или вариабельностью количественных характеристик биосистемы, так как здесь важна скорость и полнота восстановления исходных значений. Поэтому упругость биосистемы надорганизменного ранга оценивается временем полного восстановления ее количественных характеристик или же скоростью восстановления.

Поэтому оценка устойчивости к изменению свойств экосистемы получается как результат учета множества свойств, характеризующихся набором параметров оценивания, основным среди которых являются физико-географические и климатические условия, гидрологический режим и характер антропогенного воздействия.

Также стоит учитывать, что уязвимость водных экосистем циклического (озера, пруды, слабопроточные водоемы) и транзитного (реки, сильно проточные водоемы) типов обусловлена разными природными механизмами [7]. Устойчивость первого типа – «адаптационная» – главным свойством природной системы которой является ее способность сохранять первоначальное состояние или постепенно переходить в другое состояние, сохраняя внутренние связи. Устойчивость второго типа – «регенерационная» – в которой главным свойством системы выступает способность неоднократно восстанавливать свои свойства и возвращаться в исходное состояние после временного внешнего воздействия.

#### 1.4 Методы оценки устойчивости водных экосистем

В основе методик оценки устойчивости систем лежит представление об объекте окружающей среды как о сложной многопараметрической системе, то есть его качества и свойства характеризуются набором исходных параметров. В исследованиях могут использоваться как простые (аддитивные) свойства систем (масса, биомасса, концентрация, численность, объем и др.), так и сложные (неаддитивные) – устойчивость, уязвимость, благополучие и др.). В качестве основополагающих свойств и параметров оценивания выступают физико-географические и климатические условия и характер антропогенного воздействия.

Для наглядности рассмотрим две группы методов количественной оценки устойчивости природных экосистем, проанализировав различия между математической устойчивостью по Ляпунову и экологической устойчивостью.

К первой группе относят построение моделей природных экосистем с использованием дифференциальных уравнений и их устойчивости к различным возмущениям. Как одним из недостатков можно назвать проблематичность создания достаточно адекватной действительности математической модели.

Ко второй группе методов относят попытки нахождения некоей характеристики, которая бы отвечала за устойчивость всей системы, иными словами, некоего критерия качества окружающей среды. Принято считать, что такой характеристикой является функция нескольких переменных величин, которые достаточно легко измерять. Из этого следует основное достоинство метода – простота расчета этих характеристик.

Первая группа – методы математической устойчивости. Как говорилось выше, основой данных методов является наличие математической модели, описывающей динамику природных систем. В этом вопросе нас будут интересовать два вида динамических моделей: детерминистические и

стохастические. Математическая модель будет называться детерминистической, если все ее параметры и переменные – однозначно определяемые величины, а также если будет выполняться условие полной определенности информации. Следовательно, детерминистические модели используют при описании динамических систем, обладающих достаточно большими численными значениями переменных. Математическая модель называется стохастической (вероятностной), если ее параметры и переменные – случайные величины, и при условии неопределенности информации. Поэтому стохастические модели применяют при необходимости оценки вероятности какого-либо события и изменения в экосистеме, например, вероятность гибели экосистемы в целом или отдельных элементов природной экосистемы. Но стохастические модели довольно сложны для математического исследования.

Для исследования устойчивости природных систем необходимо учитывать воздействия случайного характера. И для этого не всегда обязательно строить чисто вероятностные системы. Реальные природные системы принято описывать нелинейными дифференциальными уравнениями. Так, А.М. Ляпунов работал над вопросом устойчивости решений дифференциальных уравнений к малым случайным возмущениям (Ляпунов, 1950). Основой его работы было представление о некоей траектории движения системы, которая являлась решением дифференциального уравнения, и принятая за невозмущенную. «Такая траектория движения считалась «устойчивой» если другая – возмущенная – траектория после снятия возмущения стремилась с течением времени к невозмущенной траектории» [12]. В зависимости от характера возмущений и от стремления «возмущенной» траектории к «невозмущенной» стали различать абсолютную устойчивость и асимптотическую.

Предположим, что рассматриваемая природная система имеет  $n$  степеней свободы. Тогда  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – независимые переменные, которые определяют положение природной экосистемы в  $n$  – мерном фазовом

пространстве. Будем считать, что существуют первые производные по времени переменных  $X$ , то есть  $X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*$ .

Пусть динамика природной системы описывается системой дифференциальных уравнений, которые отличаются от линейных однородных уравнений с постоянными коэффициентами лишь присутствием аддитивно входящей нелинейной функции от какой-либо из переменных:

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij}X_j + b_iY, \quad (1)$$

где  $Y = \varphi(\sigma)$ , а  $\sigma = \sum_{k=1}^n c_k X_k$

Если в (1) положить  $Y=0$ , то получается система линейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij}X_j \quad (2)$$

с характеристическим уравнением

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} \quad (3)$$

Согласно теоремам Ляпунова: если действительные части всех корней уравнения (3) отрицательны, то система устойчива к возмущениям; наличие положительных корней говорит о неустойчивости системы.

Понятие устойчивости по Ляпунову. Рассмотрим систему дифференциальных уравнений

$$\frac{dX}{dt} = X(x, t) \quad (4)$$

Пусть имеется некоторое движение – решение уравнений – системы (4)  $X=f(t)$ . Пусть оно будет невозмущенным. Движение  $X=f(t)$  называется устойчивым по Ляпунову, если для любого  $\varepsilon > 0$ , можно указать  $\sigma > 0$ , такое, что из неравенства  $|X(t_0)-f(t_0)| < \sigma$  следует неравенство  $|X_1(t)-f(t)| < \varepsilon$  при любом  $t > t_0$ , где  $X_1(t)$  – любое другое решение системы уравнений.

Асимптотически устойчивым по Ляпунову движением  $X=f(t)$  называют такое движение системы (4), если оно устойчиво в смысле Ляпунова, а при  $t$  стремящемся к бесконечности, будет выполняться равенство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |X_1(t) - f(t)| = 0 \quad (5)$$

Особенность нелинейных систем заключается в том, что нелинейные системы могут быть устойчивы для малых возмущений, но будут неустойчивы для больших.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод о том, что положение корней на комплексной плоскости полностью определяет устойчивость системы для малого возмущения. Но находить корни легко только для уравнений с невысокой степенью неизвестной величины. Корни уравнений высокой степени не находятся аналитически, но всегда известны коэффициенты характеристических уравнений. Из этого появилась идея о нахождении критерия устойчивости линейных уравнений к единичному возмущению без решения характеристических уравнений. На сегодняшний день наиболее известными критериями являются критерии Раусса-Гурвица и критерий Михайлова [9].

Для решения же проблемы устойчивости при больших возмущениях, иными словами, абсолютной устойчивости, необходим другой метод. Для



этого подойдет прямой метод Ляпунова, который математически исследует устойчивость нелинейных систем в большом и в целом. Ляпунов свел задачу об устойчивости движения к задаче об устойчивости точки покоя в начале координат фазового режима. Положение равновесия можно окружить семейством эквипотенциальных поверхностей  $V(x,y,z)=C$ .

Ляпунов выработал теоремы об устойчивом и об асимптотически устойчивом движении [12].

Теорема I. Если дифференциальные уравнения возмущенного движения таковы, что можно найти знакопостоянную функцию  $V$ , полная производная которой

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{dV}{dX_k} \times \frac{dX_k}{dt} \quad (6)$$

будет знакопостоянной функцией противоположного знака с  $V$  или тождественно равна нулю, то невозмущенное движение устойчиво.

Теорема II. Если дифференциальные уравнения возмущенного движения таковы, что можно найти знакоопределенную функцию  $V$ , полная производная которой будет знакоопределенной функцией противоположного знака с  $V$ , то возмущенное движение асимптотически устойчиво.

Благодаря функции Ляпунова можно оценить многообразие всех начальных возмущений, исчезающих со временем, а также найти устойчивость в большом и рассчитать область начальных возмущений, которые впоследствии не выйдут за пределы заданной области.

И теперь можно рассмотреть применимость понятий устойчивости по Ляпунову к изучению устойчивости природных систем. Как мы знаем, природные экосистемы, такие как биосфера в целом или ее подсистемы, могут иметь не одно положение равновесия (устойчивое или неустойчивое). Теория устойчивости Ляпунова же предполагает только одно положение

равновесия, поэтому вопрос об использовании понятия абсолютной устойчивости для биосферы по Ляпунову до конца не решен.

Но теория Ляпунова может использоваться на конкретных природных системах, возмущения которых могут быть большими, но ограниченными по модулю.

Также достаточно много примеров природных экосистем, имеющих несколько положений равновесия, которые при воздействии больших возмущений могут переходить из одного устойчивого (равновесного) состояния в другое. По Ляпунову такие системы будут неустойчивыми, с точки зрения экологии же – вполне устойчивыми природными экосистемами. Получается, что у математических теорий устойчивости Ляпунова еще нет полного соответствия и применения с понятиями устойчивости в экологии.

Вторая группа – методы нахождения критерия качества окружающей среды. Недостаток всех методов данной группы заключается в том, что они оценивают только общую реакцию экосистемы на возмущения, но не отражают количественные характеристики реакции систем на конкретные возмущения.

Рассмотрим ключевые подходы методов этой группы. Как мы знаем, зональные типы ландшафтов можно описать гидротермическими условиями. В книге А.М. Рябчикова [17] приводятся всевозможные гидротермические индексы, коэффициенты, характеризующие численным образом типы ландшафтов. Остановимся на одном из них – гидротермический коэффициент  $(ГТК)=W/R$ , где  $W$  – валовое годовое увлажнение,  $R$  – радиационный баланс. Для каждого типа ландшафта соответственно даны интервалы значений ГТК. Так, воздействуя на ГТК посредством увеличения или уменьшения валового годового увлажнения или радиационного баланса можно переводить ландшафт из одного состояния в другое. Следовательно, чем ближе ГТК природной системы к границе интервала, тем она более неустойчива.

Следующий подход основан на том, что устойчивость природной экосистемы тем выше, чем сложнее и разнообразнее структура связей внутри системы. В книге Ч.С. Элтона [21] приводятся следующие доказательства в пользу данной теории: вмешательство и заселение чужих видов на островах, всегда легче, чем на континенте, ибо на первых структура сообществ не так сложна; резкое увеличение численности какого-либо вида чаще происходит на землях, занятых человеком и сельским хозяйством, чем на нетронутых.

Еще один подход основывается на сопоставлении устойчивости сообщества с числом связей в природной экосистеме, и изначально принадлежит Р. Мак-Артуру. Р. Мак-Артур считал, что случайное возмущение, действующее на систему, может привести к увеличению численности одного из видов. Для описания устойчивости  $S$  сообщества он предложил следующую формулу:

$$S = - \sum_{i=1}^n P_i \times \log P_i \quad (7)$$

где  $P_i$  – относительная численность вида.

Из формулы Р. Мак-Артура можно сделать вывод о том, что устойчивость природной экосистемы равна нулю, если система представлена одним видом. И, следовательно, чем больше видов, тем выше устойчивость системы.

Подходы, основанные на теории информации чаще всего используют два параметра системы для оценки устойчивости: количество видов и количество особей каждого вида.

В расчетной части автор работы выполнит оценку устойчивости к изменению параметров режимов по двум методикам, приведенным ниже.

1) Балльно-индексная оценка устойчивости и уязвимости водоемов к изменению параметров естественного режима, антропогенному эвтрофированию и изменению качества воды [7].

Уязвимость водной экосистемы – утрата устойчивости экосистемы к определенному типу воздействия. Уязвимая водная экосистема при антропогенном или техногенном воздействии на нее может довольно быстро деградировать и потерять присущие ей уникальные природные свойства. Слабо уязвимая экосистема может долго противостоять внешнему воздействию, проявляющемуся в изменении параметров режимов водного объекта и тем самым быть устойчивой к внешним воздействиям.

Наиболее уязвимыми к эвтрофированию являются небольшие по величине и (или) низкопродуктивные экосистем водоемов; наиболее уязвимыми к загрязнению являются небольшие по величине и (или) сравнительно чистые экосистемы. Следовательно, наиболее устойчивыми к изменению какого-либо свойства будут те экосистемы, которые уже в значительной степени наделены этим свойством.

Параметры устойчивости и уязвимости водных экосистем объединены в экспертную балльно-индексную систему, которая учитывает региональные особенности водных объектов и дает возможность в пределах изменения заложенных в них параметров провести сравнительную оценку уязвимости водных экосистем к воздействию. Если свойства водного объекта различаются по пространству и это дает основание говорить о физико-географическом, гидрологическом, гидрохимическом и гидробиологическом районировании в пределах определенной территории (акватории), то можно провести зонирование водосборной территории или акватории водоема по баллам уязвимости (устойчивости) и выделить наиболее уязвимые и устойчивые его районы.

Оценка устойчивости и уязвимости водоемов к антропогенному эвтрофированию и к загрязнению проводится путем последовательного суммирования индексов для соответствующих признаков оценивания, разрядов и баллов по таблицам; получения суммарной балльной оценки и нахождению в итоге класса и подкласса уязвимости водоема. (таблицы 1-6). Таким образом, сначала необходимо последовательно просуммировать

индексы (табл.1-3), затем разряды, в соответствии с примечаниями к каждой таблице. После этого по сумме разрядов (табл.4) найти баллы устойчивости (уязвимости (семейство устойчивости, уязвимости)), прибавить к ней баллы трофности или качества вод (род устойчивости и уязвимости) и по полученной сумме баллов найти класс и подкласс устойчивости (уязвимости) водоема (комбинация семейств и родов).

Таблица 1 - Классификация водоемов по физико-географическим и морфометрическим признакам

Признаки /значение индекса	1	2	3	4
Площадь поверхности, км кв.	>1000	1000-101	100-10	<10
Объем, км куб.	>10	10-1,1	1,1-0,5	<0,5
Макс. глубина, м	>50	50-11	10-5,0	<5,0

Водоем с суммой индексов от 3 до 4 относится к 1 разряду, от 5 до 7 – к 6 разряду, от 8 до 11 – к 11 разряду, от 11 до 12 – к 15 разряду.

Таблица 2 - Классификация водоемов по гидрологическому режиму (уровневый и температурный режим)

Признаки /значение индекса	1	2	3	4	5
Колебание уровня, м	<3	–	3-7	–	>7
Средняя температура воды в летний период, ° С	>20	20-15	<15	–	–
Продолжительность ледостава, мес.	>5	5-2	<2	–	–

Водоем с суммой индексов от 2 до 4 относится к 1 разряду, от 5 до 7 – к 2 разряду, от 8 до 11 – к 3 разряду.

Таблица 3 - Классификация водоемов по гидрологическому режиму (условиям водообмена)

Признаки /значение индекса	1	2	3
Наличие сезонной стратификации	да	Нет	-
Вертикальное перемешивание (количество раз за год)	<2	2	>2
Условия проточности	бессточный	сточный	Проточный
Характер регулирования стока	многолетнее	сезонное	недельное или суточное
Водообмен в год	<0.1	0,1-5,0	>5,0

Водоем с суммой индексов, равной 5, относится к 1 разряду, от 6 до 8 – ко 2 разряду, от 9 до 14 – к 3 разряду.

Таблица 4 - Классификация загрязненности водных объектов по химическим параметрам

Класс качества	Очень чистые	Чистые	Умеренно загрязненные	Загрязненные	Грязные	Очень грязные
Параметры	I	II	III	IV	V	VI
Растворенный % насыщ. кислород, Абс. содержание мг/л	95	80	70	60	30	0
Лето	9	8	7-6	5-4	3-2	0
Зима	14-13	12-11	10-9	5-4	5-1	0
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	0,5-1,0	1,1-1,9	2,0-2,9	3,0-3,9	4,0-10,0	>10
ХПК, мгО <sub>2</sub> /л	1	2	3	4	5-15	>15
Аммонийный азот, мг/л	<0,05	0,1	0,2-0,3	0,4-1,0	1,1-3,0	>3,0

Таблица 5 - Балльная оценка устойчивости водоемов по физико-географическим, гидрологическим свойствам, трофности или качеству воды

Семейство устойчивости			Род устойчивости по трофическому статусу или по качеству воды		Основные комбинации семейств и родов для отмеченных (*) баллов трофии или качества			
Обозначение	Сумма разрядов	Баллы	Трофность. Качество воды	Баллы трофности. Баллы качества воды	Обозначение	Сумма баллов	Обозначение	Сумма баллов
1	2	3	4	5	6	7	8	9
IA	3-5	8	1. Гипер. и эвтрофный	1	IB1	5	ШБ1	16
IB	6-9	4	2. Эвтрофн.- мезотрофн.	3	IB2	9	ШБ2	20
IIA	10-11	13	3. Мезотрофный	5	IB3	19	ШБ3	30
IIB	12-14	10	4. Мезотрофн.- олиготр.	8	IA1	9	ША1	19
IIIA	15-16	18	5. Олиготрофный	15	IA2	13	ША2	23
IIIB	17-19	15			IA3	23	ША3	33
IVА	20-21	22	1. Очень грязная и грязная	1	IB1	11	IVБ1	21
IVБ	22-23	20	2. Загрязненная	3	IB2	15	IVБ2	25

1	2	3	4	5	6	7	8	9
			3. Умеренно загрязненная	5	ПБ3	25	IVБ3	35
			4. Чистая	8	ПА1	14	IVA1	23
			5. Очень чистая	15	ПА2	18	IVA2	27
					ПА3	28	IVA3	37

В таблице 5 класс водоема обозначен римской цифрой, он отражает физико-географические особенности водоема. Подкласс водоема обозначен заглавными буквами «А» и «Б», он отражает оптимальность условий формирования водности и качества воды. Оптимальными условиями являются не экстремальные условия, для которых сумма разрядов может быть наименьшей («А»), а наиболее благоприятные для формирования водности и качества воды промежуточные условия («Б»). Водоемы с благоприятными условиями формирования будут считаться менее уязвимыми по сравнению с водоемами с неблагоприятными условиями, поэтому в табл. А.5 им ставится в соответствие меньшее количество баллов.

Таблица 6 - Классы устойчивости и уязвимости водоемов

Класс устойчивости	Класс уязвимости	Сумма баллов	Обозначения основных комбинаций семейств и родов для отмеченных (*) баллов трофии или качества
I (макс.)	I (мин.)	5-11	IB1, IB2, IA1, IB1
II	II	13-16	IA2, ПА1, ПБ2, ШБ1,
III	III	18-23	IB3, IA3, ШБ2, ПА2, ША1, ША2, IVБ1, IVA1
IV	IV	25-28	ПБ3, ПА3, IVБ2, IVA2
V (мин.)	V (макс.)	30-37	ШБ3, ША3, IVБ3, IVA3

2) Многокритериальная оценка уязвимости и устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов.

Многокритериальная оценка – оценка состояния и воздействия на природные экосистемы с помощью построения сводных показателей по совокупности репрезентативных критериев оценивания. Многокритериальная оценка предполагает необходимость проведения

процедуры свертывания информации. Интегральная оценка включает этап, связанный с объединением в одно целое ранее разнородных (многокритериальных) оценок с учетом их веса в общую оценку. [4]

Построение интегрального показателя основывается на методе сводных показателей (МСП) или метода рандомизированных сводных показателей (МРСП) с использованием неполной, неточной и нечисловой информации. При этом реализация этапов проводится либо для нескольких уровней свертки информации, либо все параметры оценки сводились в единую исходную модель-классификацию. Первый случай более предпочтителен, потому что позволяет учитывать неравновесность уровней при нахождении интегрального показателя устойчивости. Во втором случае может учитываться только неравновесность исходных параметров при свертке.

Разработку интегрального показателя можно разделить на несколько этапов:

На первом этапе проводится отбор обоснованной системы критериев состояния биоты и абиотической среды, благодаря которым будет возможно диагностирование экологического состояния природной системы. Важным условием является то, что совокупность всех параметров должна быть достаточна для описания состояния рассматриваемой системы, а каждый параметр в отдельности необходим. Также характеристики могут быть двух типов: к первому относятся такие характеристики, увеличение значений которых приводит к улучшению значения качества; ко второму типу – характеристики, увеличение значений которых приводит к его ухудшению.

Вместе с критериями оценивания вводят классы состояния (качества, загрязнения, устойчивости и т.п.).

На втором этапе с помощью несложных преобразований избавляются от размерности исходных характеристик так, чтобы наилучшим условиям по каждому критерию соответствовало значение, равное 0, а наихудшим – равное 1 (или наоборот).



Для критериев первого типа неубывающая кусочно-степенная функция будет иметь следующий вид:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right) & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i) \quad , \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (8)$$

где  $q_i$  – преобразованное значение критерия;  $x_i$  – текущее значение критерия;  $\min_i$  – минимальное (фоновое, допустимое, безопасное, предельно-допустимое и т.п.) значение критерия;  $\max_i$  – максимальное значение критерия.

Для критериев первого типа убывающая кусочно-степенная функция будет иметь следующий вид:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right) & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i) \quad , \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (9)$$

Диапазон изменения  $q_i$  всегда находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, исходные критерии в различных шкалах измерения приводятся к безразмерным шкалам, после чего можно производить математические действия для получения интегрального показателя состояния экосистемы.

На третьем этапе выбирается вид интегрального показателя  $I(q_i, w_i)$ , который строится таким образом, что зависит не только от показателей  $q_i$ , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами  $w_i$ . В качестве выражения для интегрального показателя зададим линейную свертку показателей вида:

$$I = I(q_i, w_i) = I(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i \quad (10)$$

На четвертом этапе вводятся оценки весовых коэффициентов  $w_i$ . Чаще всего используют следующие способы: вес каждого из отобранных параметров принимается равным; вес наиболее важных параметров увеличивается в условное число раз; вес определяется с помощью мнений экспертов; вес каждого показателя определяется с помощью дополнительных расчетов. При равенстве весов всех исходных параметров, вес определяется формулой

$$w_i = 1/m \quad (11)$$

Далее на пятом этапе для левой и правой границ каждого класса рассчитывается значение  $I$ . В результате получается шкала интегрального показателя по классам состояния при условии равновесного (неравновесного) учета всех параметров оценивания.

Сравнение состояния экосистем с помощью интегральных методик позволяет количественно оценить пространственно-временные особенности их динамики, степень их антропогенной трансформации, тенденции их изменения, степень допустимого воздействия на них.

## Глава 2. Характеристика оз. Выгозера

### 2.1 Физико-географические и гидрологические характеристики озера

Выгозеро (Выгозерское водохранилище) – водоём в Европейской части России, Республике Карелии. Относится к бассейну Белого моря.

В связи с включением озера в трассу Беломорско-Балтийского канала (ББК) с 1932 г. оно превращено в водохранилище многолетнего регулирования стока при подпоре реки Выг, сток из озера осуществляется через соединительный канал в Ондское водохранилище, далее через Ондский гидроузел в р.Нижний Выг. Расходы воды по основным створам: соединительный канал озера Выг – Ондское водохранилище – 200-250 м<sup>3</sup>/сек; отводящий канал Ондской ГЭС – 270-360 м<sup>3</sup>/сек; Сегезерский гидроузел – 25 м<sup>3</sup>/сек.

Уровень воды в озере был поднят на 7 м, что привело к затоплению больших территорий и увеличению площади водоема почти в 2 раза с 560 до 1250 км<sup>2</sup>. С затопленной территории в водохранилище поступало большое количество органических и минеральных веществ, в основном это были древесные и травянистые остатки, всплывшие торфяники и размываемые почвы. Последствия превращения озера в водохранилище отразились на его гидрохимическом режиме, а также привели к изменениям в растительном и животном мире озера.

Водоём имеет котловину ледникового происхождения, вытянут с севера запада на юго-восток и расчленен на отдельные части и заливы. Береговая линия извилиста, берега каменистые. Побережье покрыто лесом, местами заболочено.

Основные морфометрические характеристики водоема. Площадь водной поверхности составляет 1159 км<sup>2</sup>, общая площадь с островами – 1285 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 20 м. Наибольшая длина равна 89,2 км, а

наибольшая ширина – 23,5 км. По размерам площади Выгозеро занимает 3 место среди озер Карелии (после Ладожского и Онежского озер).

В водоем впадает более 25 притоков. Наиболее крупные притоки — Верхний Выг (154 км), Сегежа (72 км) и Вожма (75 км).

Сезонные колебания уровня воды, связанные со снеговым и дождевым питанием в сочетании с регулированием стока, составляют 0,5—1,3 м. Весенний подъем воды продолжается до июля, после чего идет замедленный спад уровня воды в течение лета. Быстрое снижение уровня производится в декабре — январе. Наиболее низкий уровень обычно наблюдается в апреле.

В летний период вода быстро прогревается и в июле температура воды достигает 17-21°C, а в придонных слоях – 13-17°C. Установившаяся термическая стратификация часто нарушается из-за ветрового перемешивания, следствием чего является скачкообразное повышение температуры в придонном слое воды летом. Замерзает озеро в конце октября-ноябре, вскрывается в середине мая.

Вода имеет слабую минерализацию и большую прозрачность (1,4-2,4 м). Цвет воды коричневый, местами с красноватым оттенком. Вода содержит много гуминовых веществ. Наиболее высокие величины окисляемости наблюдаются в юго-восточных районах водохранилища. В северных районах содержание растворенных веществ возрастает из-за поступления сточных вод Сегежского Целлюлозно-Бумажный комбината (СЦБК).

Кислородный режим удовлетворителен в летнее время из-за ветрового перемешивания, но заметно ухудшается в придонных слоях к окончанию ледостава, что является следствием поступления загрязненных вод от СЦБК. Концентрация кислорода в летний период на поверхности и у дна различается незначительно и составляет 8,8-9,7 и 8,3-9,1 мг/л соответственно. Величина рН у поверхности воды – 6,8-7,1, в придонных слоях – 6,6-6,9. В конце зимы концентрация кислорода подо льдом составляет 11,1 – 12,9 мг/л, а в придонном слое – 7,1 – 0,4 мг/л [3].

Почвы. В прибрежной зоне распространены каменисто-песчаные и каменистые грунты с древесными и торфяными остатками. Заиление грунтов начинается с 4 – 7 м глубины. Илы занимают около половины площади дна водохранилища.

Флора и фауна. Высшая водная растительность представлена осокой и вахтой трёхлистной, реже хвощом, кубышкой и др. Донная фауна довольно разнообразна, наиболее многочисленны хирономиды (82–96% по весу). На литорали, кроме хирономид, часто встречаются поденки, ручейники, брюхоногие моллюски (лимнея, планорбис), олигохеты и др. В более глубоководных районах донная фауна обеднена. Биомасса зообентоса в северной, наиболее загрязняемой части озера оценивается в 0,2–0,6 г/м<sup>2</sup>, в центральной – до 3,8 г/м<sup>2</sup>. После превращения Выгозера в водохранилище зоопланктон сохранился без особых изменений в качественном отношении, но увеличился количественно. Комплекс зоопланктона состоит в основном из планктонных рачков; коловраток мало. Численность зоопланктона увеличивается от северных районов озера к юго-восточным.

В Выгозере обитают рыбы 11 видов, из них основные промысловые – лещ, ряпушка, щука, налим, окунь, плотва. Действие Сегежского целлюлозно-бумажного комбината конечно же напрямую сказывается на качестве воды и рыбы – вся выловленная рыба вблизи города Сегежи имеет устойчивый специфический запах. По мере удаления из города запах начинает исчезать, мясо рыбы становится более пригодным для употребления в пищу.

Выгозеро является судоходным: с пассажирскими, туристическими и грузовыми линиями.

## 2.2 Изменение параметров режимов в следствие антропогенной нагрузки

Выгозеро в естественном состоянии существовало до 1931 г. В результате хозяйственного освоения водоем подвергся двум существенным антропогенным изменениям. Первое крупное преобразование было вызвано строительством в 1932 г. Беломорско-Балтийского канала и возведением Сегежского целлюлозно-бумажного комбината на северном берегу Выгозера г. Сегежа в 1939 году. Второе преобразование было связано с активным использованием энергетического потенциала водных ресурсов р. Нижний Выг в 1954 г. А последующее преобразование гидрографической сети – сооружение 9 гидроузлов и превращение крупных озер (Выгозеро, Сегозеро, Ондозеро) в водохранилища – привело к практически полной зарегулированности поверхностных вод р. Нижний Выг.

Современный гидрологический режим Выгозерско-Ондского водохранилища установился с 1957 г.

На рисунке 1 показаны стадии преобразования Выгозера в следствие хозяйственной деятельности.

Таким образом, выделяют три этапа формирования Выгозера:

1. оз. Выгозеро – до 1932 г.;
2. водохранилище Выгозерское 1934-1955 гг.;
3. водохранилище Выгозерско-Ондское 1957 г. - настоящее время.

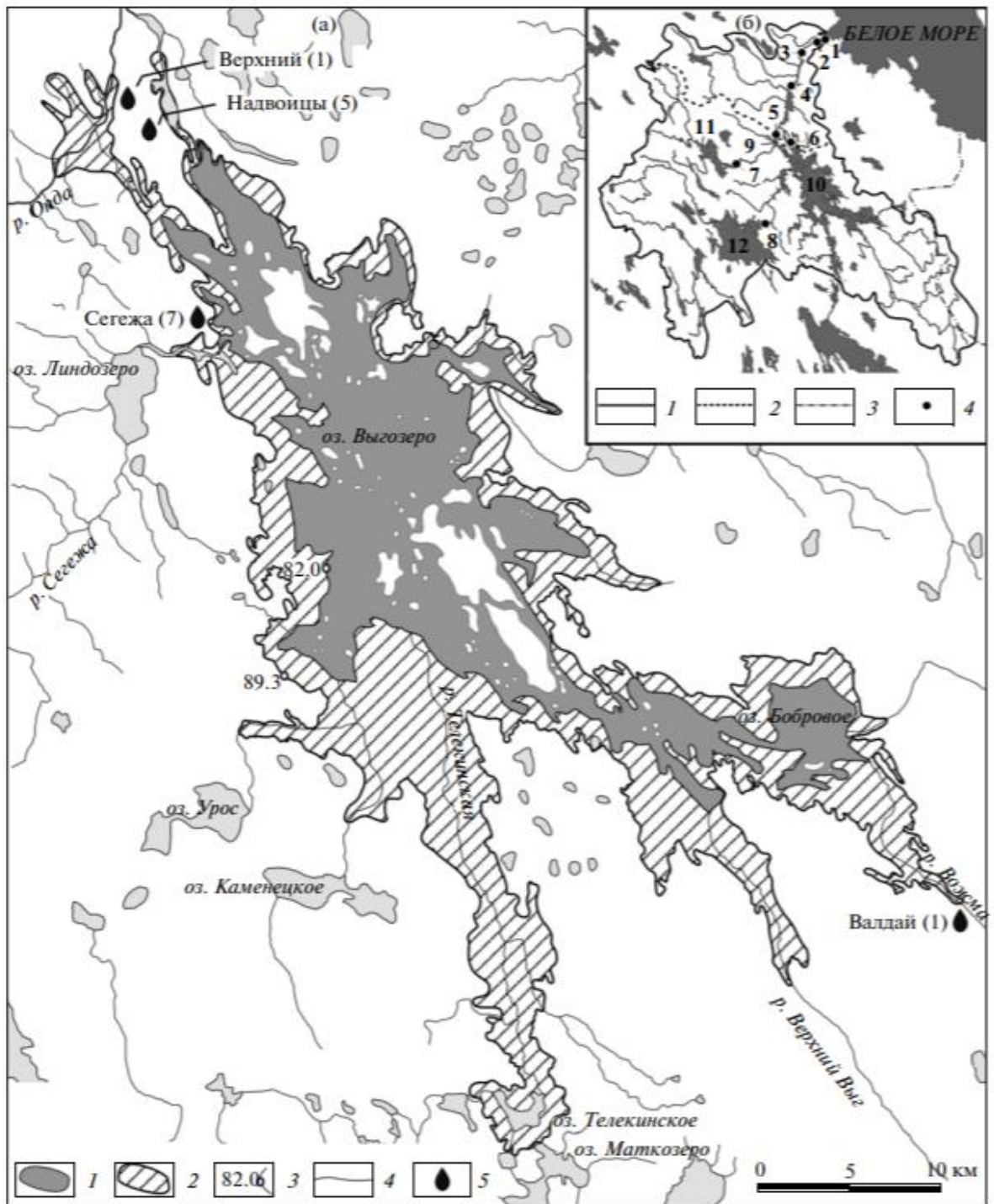


Рисунок 1 – карта-схема водохозяйственного комплекса ББК

1 – Выгозеро в естественном состоянии; 2 – современные очертания Выгозерско-Ондского водохранилища

*Источник: Литвиненко А.В., Филатов Н.Н., Богданова М.С., Карпечко В.А., Литвинова И.А. Антропогенная трансформация и хозяйственное использование озера Выгозеро. Водные ресурсы. Том 41. № 4. 2014. С. 419-429 (RISC).*

В таблице 7 приведены основные гидрологические характеристики Выгозера на трех стадиях его существования.

Таблица 7 – Основные характеристики Выгозерско-Ондского водохранилища в различные периоды эксплуатации

Название водоема	Период	Средний уровень, м	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Глубина, м		Объем, км <sup>3</sup>
				средняя	максимальная	
оз. Выгозеро	до 1932 г.	82.7	561	6.1	18.0	3.4
вдхр. Выгозерское	1934-1955 гг.	88.8	1196	7.2	25.0	8.7
вдхр. Выгозерско-Ондское	1957-1974 гг.	89.1	1270	7.1	25.0	9.1

*Источник: Кабранова А.И. Водный баланс Выгозерско-Ондского водохранилища // Сб. работ ЛГМО. Вып. 11. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 78–93.*

С учетом морфометрических особенностей водохранилища: проточности, приточности и качества воды отдельных районов, озеро поделено на четыре основных участка: юго-восточную часть, подверженную влиянию рек Верхний Выг и Вожма, южную, центральную и Северное Выгозеро, которое как раз и подвержено непосредственному влиянию сточных вод Сегежского Целлюлозно-Бумажного Комбината.

Химический состав воды Выгозерского водохранилища зависит в основном от антропогенной нагрузки на водоем и гидрологические особенности водохранилища, а также характера и мест выпуска сточных вод.

На характере загрязнения водохранилища и на распространении сточных вод сказывается характер сброса сточных вод и его месторасположение. До 1976 г. сброс сточных вод осуществлялся в залив Лайкоручей и наибольшее загрязнение отмечалось в приустьевой части р. Сегежи и затрагивало Западную часть Северного Выгозера и незначительно – восточную. После ввода в эксплуатацию станции биологической очистки



(СБО) сброс был перенесен в Мозог-губу и биологически очищенные сточные воды стали оказывать большее влияние на Северное Выгозеро. На протяжении всего времени осуществлялся береговой сброс, имеющий существенное влияние на распространение загрязненных вод в зимний период. Теплые сточные воды, поступая в водоем зимой, охлаждались до температуры максимальной плотности, опускались на дно и распространялись по понижениям дна котловины, постепенно заполняя все углубления, и достигали Центрального Выгозера и п. Надвоицы. Весной после вскрытия льда происходило перемешивание водных масс, и загрязненными оказывались вся северная и отчасти центральная части водохранилища. Вследствие наличия стокового течения происходил вынос загрязненных вод р. Нижний Выг, и к летнему периоду наблюдалось «очищение» водохранилища от накопленных в нем в зимний период сточных вод, но поступали новые сточные воды [10].

Основным источником антропогенного воздействия на экосистему является Сегежский Целлюлозно-бумажный комбинат, поэтому на примере именно его влияния на состояние Северного Выгозера автор выполнил оценку устойчивости водоема к изменению параметров режима и качества воды.

В расположенном на северном берегу Выгозера г. Сегежа с 1939 г. функционирует Целлюлозно-бумажный Комбинат.

Строительство Беломорско-Балтийского канала способствовало быстрым темпам развития экономик Выгозерского края, поэтому уже в 1936 году было принято Постановление «О строительстве Сегежского лесобумкомбината», а 30 июня 1939 года СЦБК был окончательно введен в эксплуатацию. Предполагалось, что комбинат будет специализироваться на сульфатной целлюлозе, крафте, оберточной бумаге и бумажных мешках. На первых этапах мощность комбината составляла 113,1 тыс. тонн целлюлозы, 83 тыс. тонн бумаги, 114 млн. штук бумажных мешков и 70 тыс. тонн товарной целлюлозы в год. В течении 15 лет начиная с 1960-ых годов

проводилась крупная техническая реконструкция, а к середине 1980-х была введена в эксплуатацию станция биологической очистки сточных вод ЦБК. После ввода в эксплуатацию новых основных производственных фондов комбинат стал одним из крупнейших предприятий по производству бумажной тары. В конце же 1980-х годов неблагоприятная экономическая ситуация в стране значительно повлияла на предприятие: снизились производительные мощности, комбинат стал акционером, а позже и банкротом. В 1992 году комбинат был реорганизован в ОАО «Сегежбумпром» с государственным участием. В состав ОАО «Сегежбумпром», наряду с ЦБК, вошли — лесопильно-деревообрабатывающий комбинат «Сегежский», ОАО «Сегежалес», «Валдайлес». В 2006 году был основан лесопромышленный холдинг ЗАО «Инвестлеспром», в состав которого вошёл и Сегежский ЦБК, став крупнейшим целлюлозно-бумажным активом холдинга.

Все изменения в техническом оборудовании и производственных мощностях предприятия в разные годы его функционирования напрямую оказывали влияние на количество и качество сточных вод.

Загрязненные сточные воды СЦБК характеризуются наличием таких вредных веществ, как сульфаты, хлориды, нефтепродукты, фенолы, лигносульфонаты, (формальдегид, метанол, фурфурол, диаметилсульфид, скипидар, сероводород, лигнин, азот аммонийный).

За многолетний период работы СЦБК можно выделить несколько периодов в соответствии с уровнем антропогенной нагрузки и реакции экосистемы на нее, а также выявить периоды максимальной и минимальной нагрузки по сравнению с природной. (таблица 8)

Таблица 8 - Антропогенная и природная нагрузки на Северное Выгозеро

Показатель	Антропогенная		Природная
	максимальная	минимальная	
Взвешенные вещества, г/м <sup>2</sup> в год	110 (1964-1965 гг.)	12 (1995-2010 гг.)	18
ОВ, г/м <sup>2</sup> в год	143 (1969-1975 гг.)	15 (1995-2010 гг.)	360
Лабильные ОВ, г О <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> в год	86 (1969-1975 гг.)	7 (1992-2010 гг.)	11
Р <sub>общ</sub> , г/м <sup>2</sup> в год	0,47 (1976-1981 гг.)	0,03 (1995-2010 гг.)	0,31
Фенолы, г/м <sup>2</sup> в год	0,47 (1969-1975 гг.)	0,03 (1995-2010 гг.)	0,09

Наибольшее загрязнение взвешенными веществами приходилось на конец 1960-х – начало 1970-х гг., которое было связано с увеличением производства СЦБК. После внедрения системы очистки сточных вод в середине 1980-х г антропогенная нагрузка от взвешенных частиц снизилась и больше не возрастала. По общему содержанию органических веществ (ОВ) и лабильных ОВ максимальная нагрузка наблюдалась в период 1969-1975 гг. Минимальная нагрузка ОВ и лабильных ОВ была до 1960-х гг. и в последние десятилетия, что связано с уменьшением объемов производства. Наибольшее влияние фтора (Р<sub>общ</sub>) – основного лимитирующего биогенного элемента – наблюдалось в 1976 -1981 гг., в период вывода станции биологической очистки на проектные показатели. Период 1980-х и начала 1990-х гг. характеризовался наибольшей фосфорной нагрузкой на водоем, которая стала снижаться только с началом сокращения производства в 1990-е, и в последние годы составляет примерно 0,03 г/м<sup>2</sup>. Наибольшая нагрузка фенолами наблюдался в период 1969 – 1975 гг. до работы СБО, а к 1995 – 2010 гг. она снизилась почти в 15 раз, благодаря запуску станции очистки и снижению объемов производства СЦБК.

Распределение загрязненных вод сильно разнилось в зимний период и период открытой воды. Зимой наибольшее загрязнение вод приходилось на

придонные слои, а в период открытой воды – по всей площади и глубине западной части Северного Выгозера. (таблица 9)

Таблица 9 - Химические показатели воды в разные периоды года

Показатель		1964-1965 гг.	1969-1975 гг.	1976-1981 гг.	1982-1991 гг.	1995-2010 гг.
БПК <sub>5</sub> , Мг О <sub>2</sub> /л	1	12	24	19	13	2,6
	2	1,0	1,6	1,5	1,2	0,7
О <sub>2</sub> , %	1	0-40	0	0-2	0-10	2-37
	2	58-86	20-83	30-86	48-82	79-95
Р <sub>общ</sub> , мг/л	1	-	-	240	424	348
	2	20	24	50	34	16
Фенолы, мкг/л	1	-	50	60	-	15
	2	-	15	10	5	5

Примечание:

- 1 – придонные слои в зимний период,
- 2 – водные массы в период открытой воды.

Наибольшее содержание Р<sub>общ</sub> наблюдалось в 1976-1981 гг. в период вывода станции биологической очистки на проектные показатели. В последние десятилетия уровень концентрации Р<sub>общ</sub> близок к природному.

Также изменился кислородный режим водоема – из дефицитного по кислороду перешел к близко равновесному состоянию по содержанию кислорода в воде. Но несмотря на уменьшение загрязненности воды в среднем за год, в период зимней стагнации в отдельных районах Выгозера продолжает наблюдаться дефицит кислорода и загрязнение вод в придонных слоях.

Необходимо отметить изменения в водных сообществах.

Изначально в период постройки и работы СЦБК не было опасности эвтрофирования водоема и водохранилище испытывало лишь нагрузку, вызванную высокими концентрациями токсических веществ от прямой деятельности ЦБК. Но после введения в эксплуатацию СБО вследствие поступления в воду водоема высоких концентраций биогенных элементов, в основном, фосфора со сточными водами предприятия, произошло антропогенное эвтрофирование северной части водоема. Вследствие этого

сброса неочищенных сточных вод с большим содержанием органических веществ было выявлено преобладание сапрофитных бактерий в сообществах. [Доля видов-индикаторов сапробности достигала 57% от всего состава водорослей. Большинство из них (60%) относились к олигосапробным (25%), олиго-Р-мезосапробным (20%) и β-мезосапробным формам (42%).]

В самых загрязненных участках водоема было замечено изменение структуры зоопланктона: исчезали наиболее уязвимые виды, такие как каланоиды, и превалировали мелкие циклопы, ветвистоусые рачки (*Daphnia cistata*, *Bosmina longirostris*), коловратки (*Kellicottia*, *Polyarthra*). В донных комплексах доминировали хиронгомиды, в особенности личинки рода *Procladius*. Трофический статус Выгозера определялся как олиго-β-мезотрофный и вода соответствовала II-III классу качества вод.

Строительство СБО привело к уменьшению загрязнения водоемов за счет очистки сточных вод, но в тоже время способствовало быстрому антропогенному эвтрофированию водоема.

До введения в эксплуатацию СБО в июне 1972 года в планктоне преобладали диатомовые *Aulacoseira islandica* Simonsen, *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kutz., *Asterionella Formosa* Hass., доля которых в фитопланктоне достигала 50-85% в суммарной численности и биомассе фитопланктона.

После введения СБО в период 1992-1993 гг. было отмечено резкое возрастание количественных показателей фитопланктона и видового разнообразия за счет золотистых, сине-зелёных, зеленых водорослей. В период снижения мощности производства на ЦБК отмечалось понижение уровня развития весеннего фитопланктона в 3-4 раза, значения количественных характеристик фитопланктона снизились и определялись 247 тыс. кл./л и 0,29 г/м<sup>3</sup> для численности и биомассы соответственно. Все изменения в количественных характеристиках фитопланктона по периодам представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Количественные показатели фитопланктона в северной части Выгозера

Год	Показатель	Среднее значение
1972	Численность, тыс.кл./л	223
	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	0,39
1992	Численность, тыс.кл./л	655±182
	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	0,52±0,16
1993	Численность, тыс.кл./л	711±115
	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	1,67±0,31
1999	Численность, тыс.кл./л	247±63
	Биомасса, г/м <sup>3</sup>	0,29±0,03

*Составлена по данным Вислянская И.Г., 1978. Фитопланктон Выгозерского водохранилища / Гидробиология Выгозерского водохранилища. Петрозаводск: КФ АН СССР. Ред. В. Соколова. С. 15-42.*

На сегодняшний день большая часть акватории Выгозера относится к природному олиготрофному состоянию, северные районы – к мезотрофному. Вследствие антропогенного эвтрофирования были отмечены изменения в структуре фитопланктона, в сторону увеличения числа видов, являющихся показателями повышения уровня трофии и органического загрязнения водоемов.

Таблица 11 - Исходные данные основных морфометрических и гидрологических характеристик для оценки устойчивости оз.Выгозера

Признаки	Период	
	до 1932 г.	с 1939 г.
Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	560	1250
Объем, км <sup>3</sup>	4,2	6,5
Макс. глубина, м	18	25
Амплитуда колебаний уровня, м	0,5-0,8	0,5-1,3
Средняя температура воды в летний период, ° С	18	19
Продолжительность ледостава, мес.	6	6
Наличие сезонной стратификации	Да	Да
Вертикальное перемешивание (количество раз за год)	1	1
Условия проточности	Проточный	проточный
Характер регулирования стока	Сезонное	многолетнее
Коэффициент водообмена в год	1,1	1,1

Таблица 12 – Исходные данные для оценки устойчивости к изменению качества воды оз.Выгозеро

Признаки	Период		
	до 1932 г.	1976-1981 гг.	1982-2007 гг.
Растворенный кислород, % насыщения	80-85	30	84
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	1,02	1,5	1,2
ХПК, мгО <sub>2</sub> /л	25	40	30
Цветность, град	58	60	65
Степень закисления, рН	7,1	6,65-7,06	6,7-7,3

Таблица 13 – Исходные данные для оценки устойчивости к эвтрофированию оз.Выгозеро

Признаки	Период		
	1969-1975 гг.	1976-1981 гг.	1982-2007 гг.
Содержание общ. фосфора (Р), мкг/л	24	60	16
Прозрачность, м	1,7	1,7	1,7
Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период	0,39	1,39	0,31

## Глава 3. Оценка устойчивости водных объектов по заданным параметрам на примере водоема Выгозеро

### 3.1 Оценка устойчивости водоема по методике балльно-индексной оценки уязвимости водоемов

Балльно-индексная методика является рекогносцировочным этапом, необходимым для обоснования и выбора параметров оценивания, построения оценочных шкал, осмысления результатов оценивания, но зачастую недостаточным для объективной оценки устойчивости изучаемого водного объекта [14].

Для того чтобы наглядно показать ответную реакцию водоема на воздействующие на него антропогенные изменения, автором были выбраны 3 периода для оценки параметров водоема и его устойчивости:

до 1932 г. – состояние водной акватории до включения Выгозера в трассу ББК и строительства Сегежского ЦБК;

с 1965 по 1978 гг. – состояние водной акватории до ввода в эксплуатацию станции биологической очистки сточных вод СЦБК и увеличении мощностей производства;

с 1980 по 2007 гг. – состояние водной акватории после ввода СБО и уменьшения объемов производства.

В период до 1932 г. водоем:

– по физико-географическим и морфометрическим признакам относится к 6 разряду;

– по первой группе гидрологических признаков (уровенный и температурный режимы) относится к 1 разряду;

– по второй группе гидрологических признаков (условия водообмена) относится к 3 разряду;



– воды Выгозера соответствуют II классу качества воды, а по трофическому статусу относится к олиго-β-мезотрофному.

Семейство уязвимости – ПА (сумма разрядов = 10, баллы – 13). Род уязвимости по качеству воды: II классу качества воды соответствует 8 баллов. Сумма баллов по семейству уязвимости и роду уязвимости по качеству воды  $13б + 8б = 21б$ .

По таблице 6 водоем относится к III классу уязвимости, следовательно, обладает средней устойчивостью к изменению параметров естественного и антропогенного режимов.

В период с 1965 по 1978 гг. водоем:

– по физико-географическим и морфометрическим признакам относится к 6 разряду;

– по первой группе гидрологических признаков (уровенный и температурный режимы) относится к 1 разряду;

– по второй группе гидрологических признаков (условия водообмена) относится ко 2 разряду;

– вода соответствует IV классу качества воды, а по трофическому статусу относится к олиго-β-мезотрофному.

Семейство уязвимости – ИБ (сумма разрядов = 9, баллы – 4). Род уязвимости по качеству воды: IV классу качества воды соответствует 3 балла. Сумма баллов по семейству уязвимости и роду уязвимости по качеству воды  $4б + 3б = 7б$ .

По таблице 6 водоем относится к I классу уязвимости, следовательно, обладает максимальной устойчивостью к изменению параметров естественного и антропогенного режимов.

В период с 1980 по 2007 гг. водоем:

– по физико-географическим и морфометрическим признакам относится к 6 разряду;

– по первой группе гидрологических признаков (уровенный и температурный режимы) относится к 1 разряду;

– по второй группе гидрологических признаков (условия водообмена) относится ко 2 разряду;

– вода соответствует III классу качества воды, а по трофическому статусу относится к мезотрофному.

Семейство уязвимости – IB (сумма разрядов = 9, баллы – 4). Род уязвимости по качеству воды: III классу качества воды соответствует 5 баллов. Сумма баллов по семейству уязвимости и роду уязвимости по качеству воды  $4б + 5б = 9б$ .

По таблице 6 водоем относится к I классу уязвимости, следовательно, обладает максимальной устойчивостью к изменению параметров естественного и антропогенного режимов.

3.2 Оценка устойчивости водоема по методике многокритериальной оценки устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов

Применение МСП позволяет количественно оценить пространственно-временные особенности динамики экосистем, степень их антропогенной трансформации, тенденции их изменения, степень допустимого воздействия на них.

В таблицах 14-16 приведены примеры исходных классификаций для многокритериальной оценки устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима, изменению качества вод и антропогенному эвтрофированию.

Таблица 14 – Пример исходной классификации для оценки устойчивости водоемов к изменению параметров естественного режима

Признаки	Классы устойчивости				
	I max	II	III	IV	V Min
1.Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	20000-15000	15000-10000	10000-5000	5000-1000	1000-10
2.Объем, км <sup>3</sup>	400-300	300-200	200-100	100-10	10-1
3.Максимальная глубина, м	200-150	150-100	100-50	50-10	10-5
4.Ср. t воды в летний период, С	25-22	22-20	20-18	18-15	15-12
5.Продолжительность ледостава, мес.	6-5	5-4	4-3	3-2	2-0
6.Вертикальное перемешивание, количество раз за год	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
7.Коэффициент водообмена	0-0,2	0,2-1	1-3	3-5	5-6
8.Амплитуда колебаний уровня, м	0,5-1	1-2	2-3	3-4	4-5
9.Наличие сезонной стратификации, баллы	1	1	1-2	2	2
10.Условия проточности, баллы	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
11.Характер регулирования, баллы	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6

Примечание:

1. Наличие сезонной стратификации соответствует один балл, отсутствию сезонной стратификации соответствует два балла.
2. По условиям проточности бессточному водоему соответствует 1-3 балла, сточному водоему – 3-4 балла, проточному водоему – 4-6 баллов.
3. По характеру регулирования многолетнему регулированию соответствуют 1-3 балла, сезонному регулированию – 3-4 балла, недельно-суточному регулированию – 4-6 баллов.

Таблица 15 - Пример исходной классификации для оценки устойчивости водоемов к изменению качества воды

Признаки	Классы устойчивости				
	I max	II	III	IV	V Min
Растворенный кислород, % насыщения	0-30	30-60	60-80	80-95	95-100
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	5-4	4-3	3-2,1	2,1-1	1-0,5
ХПК, мгО <sub>2</sub> /л	5,5-4	4-3	3-2	2-1	1-0
Цветность, град.	>160	160-120	120-80	80-40	<40
Степень закисления, рН	4,0-4,5	4,5-5,5	5,5-6,0	6,0-6,5	6,5-7,5

Таблица 16 - Пример исходной классификации для оценки устойчивости водоемов к антропогенному эвтрофированию

Признаки	Классы устойчивости				
	I max	II	III	IV	V Min
Содержание общ. фосфора (P), мкг/л	150-100	100-50	50-15	15-5	5-0
Прозрачность, м	0,1-0,5	0,5-2,0	2,0-5,0	5,0-7,0	7,0-10
Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период	10-7	7-3	3-1	1-0,5	0,5-0

В таблице 17 представлены нормированные значения параметров оценивания устойчивости и квалитетическая шкала интегрального показателя ( $I_1$ ) устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного режима при равенстве весов между признаками ( $w_i=0,091$ ).

Таблица 17 – Нормированные значения критериев оценивания устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима

Признаки	Классы устойчивости				
	I max	II	III	IV	V Min
1	2	3	4	5	6
1.Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	1-0,750	0,750-0,500	0,500-0,250	0,250-0,050	0,050-0
2.Объем, км <sup>3</sup>	1-0,749	0,749-0,499	0,499-0,248	0,248-0,023	0,023-0
3.Максимальная глубина, м	1-0,744	0,744-0,487	0,487-0,231	0,231-0,026	0,026-0
4.Ср. t воды в летний период, C	1-0,769	0,769-0,615	0,615-0,462	0,462-0,321	0,321-0
5.Продолжительность ледостава, мес.	1-0,833	0,833-0,667	0,667-0,500	0,500-0,333	0,333-0
6.Вертикальное перемешивание, количество раз за год	1-0,800	0,800-0,600	0,600-0,400	0,400-0,200	0,200-0
7.Коэффициент водообмена	1-0,967	0,967-0,833	0,833-0,500	0,500-0,167	0,167-0
8.Амплитуда колебаний уровня, м	1-0,889	0,889-0,667	0,667-0,444	0,444-0,222	0,222-0
9.Наличие сезонной стратификации, баллы	1	1	1-0	0	0
10.Условия проточности, баллы	1-0,800	0,800-0,600	0,600-0,400	0,400-0,200	0,200-0
11.Характер регулирования, баллы	1-0,800	0,800-0,600	0,600-0,400	0,400-0,200	0,200-0

1	2	3	4	5	6
$I_1$	1-0,828	0,828- 0,645	0,645- 0,355	0,355- 0,161	0,161-0

В таблицах 18 и 19 представлены нормированные значения параметров оценивания устойчивости и квалиметрические шкалы интегрального показателя устойчивости водных объектов к изменению качества воды ( $I_2$ ) и эвтрофированию ( $I_3$ ) при  $w_i=0,2$  и  $w_i=0,33$  соответственно.

Таблица 18 – Нормированные значения критериев оценивания устойчивости водоема к изменению качества воды

Признаки	Классы устойчивости				
	I max	II	III	IV	V min
Растворенный кислород, % насыщения	1-0,700	0,700- 0,400	0,400- 0,200	0,200- 0,050	0,050-0
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	1-0,778	0,778- 0,556	0,556- 0,333	0,333- 0,111	0,111-0
ХПК, мгО <sub>2</sub> /л	1-0,727	0,727- 0,545	0,545- 0,364	0,364- 0,182	0,182-0
Цветность, град.	1-0,789	0,789- 0,579	0,579- 0,368	0,368- 0,158	0,158-0
Степень закисления, рН	1-0,857	0,857- 0,571	0,571- 0,429	0,429- 0,286	0,286-0
$I_2$	1-,770	0,770- 0,530	0,530- 0,339	0,339- 0,157	0,157-0

Таблица 19 – Нормированные значения критериев оценивания устойчивости водоема к эвтрофированию

Признаки	Классы устойчивости				
	I max	II	III	IV	V Min
Содержание общ. фосфора (P), мг/л	1-0,667	0,667- 0,333	0,333- 0,100	0,100- 0,033	0,033-0
Прозрачность, м	1-0,960	0,960- 0,808	0,808- 0,505	0,505- 0,303	0,303-0
Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период	1-0,700	0,700- 0,300	0,300- 0,100	0,100- 0,050	0,050-0
$I_3$	1-0,776	0,776- 0,480	0,480- 0,235	0,235- 0,128	0,128-0

Исходными данными для расчета интегрального показателя второго уровня свертки информации служат результаты первого уровня свертки информации:

– индекс устойчивости к изменению параметров естественного режима и снижению качества воды ( $I_I=I_1+I_2$ );

– индекс устойчивости к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию ( $I_{II}=I_1+I_3$ ).

При этом веса для второго уровня свертки равны  $w_i=0,5$ .

Результаты расчета интегрального показателя второго уровня свертки информации представлены в таблицах 20 и 21.

Таблица 20 – Устойчивость к изменению параметров естественного режима и к снижению качества воды

I <sub>I</sub>	Классы устойчивости				
	I Max	II выше средней	III Средняя	IV Ниже средней	V Min
	1-0,799	0,799-0,588	0,588-0,347	0,347-0,159	0,159-0

Таблица 21 – Устойчивость к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию

I <sub>II</sub>	Классы устойчивости				
	I Max	II выше средней	III Средняя	IV Ниже средней	V Min
	1-0,802	0,802-0,563	0,563-0,295	0,295-0,145	0,145-0

Таблица 22 – Нормированные данные параметров оценивания устойчивости Выгозера к изменению параметров естественного режима

Признаки	Период	
	до 1932 г.	с 1939 г.
1	2	3
Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	0,027	0,062
Объем, км <sup>3</sup>	0,008	0,013
Макс. глубина, м	0,067	0,103
Амплитуда колебаний уровня, м	0,967	0,889
Средняя температура воды в летний период, °С	0,462	0,538

1	2	3
Продолжительность ледостава, мес.	1	1
Наличие сезонной стратификации	1	1
Вертикальное перемешивание (количество раз за год)	0	0
Условия проточности	0,2	0,2
Характер регулирования стока	0,4	0,2
Коэффициент водообмена	0,843	0,843
I <sub>1</sub>	0,452	0,441

Таблица 23 – Нормированные данные параметров оценивания устойчивости Выгозера к изменению качества воды

Признаки	Период		
	до 1932 г.	1976-1981 гг.	1982-2007 гг.
Растворенный кислород, % насыщения	0,175	0,7	0,16
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л	0,116	0,22	0,156
ХПК, мгО <sub>2</sub> /л	1	1	1
Цветность, град	0,15	0,17	0,21
Степень закисления, рН	0,114	0,185	0,142
I <sub>2</sub>	0,311	0,455	0,334

Таблица 24 – Нормированные данные параметров оценивания устойчивости Выгозера к эвтрофированию

Признаки	Период		
	1969-1975 гг.	1976-1981 гг.	1982-2007 гг.
Содержание общ. фосфора (Р), мкг/л	0,16	0,4	0,11
Прозрачность, м	0,83	0,83	0,83
Средняя биомасса фитопланктона за вегетационный период	0,039	0,139	0,031
I <sub>3</sub>	0,343	0,456	0,324

Таблица 25 – Значения сводного показателя и классы устойчивости к изменению параметров естественного режима и к изменению качества воды для исследуемых периодов

Период	Значение I <sub>1</sub> (класс устойчивости)
До 1932 г.	0,382 (III)
1976-1981 гг.	0,448 (III)
1982-2007 гг.	0,388 (III)

Таблица 26 - Значения сводного показателя и классы устойчивости к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию для исследуемых периодов

Период	Значение I <sub>II</sub> (класс устойчивости)
1969-1975 гг.	0,392 (III)
1976-1981 гг.	0,449 (III)
1982-2007 гг.	0,383 (III)

### 3.3 Анализ полученных результатов

Анализ проведенной оценки устойчивости на основе балльно-индексной показал, что:

– в природном состоянии до 1932 г. оз. Выгозеро относилось к семейству уязвимости ПА, что указывает на неблагоприятные условия формирования водоема, а, следовательно, на большую уязвимость. Оз. Выгозеро соответствовало III классу уязвимости, то есть озеро обладало средней устойчивостью к изменению качества воды и трофического статуса, что объясняется большой площадью поверхности и объемом озера, низким колебанием уровня, большой продолжительностью ледостава, а также сильной проточностью озера и сезонным характером регулирования.

– в период 1965 – 1978 гг. отмечалась самая высокая величина антропогенной нагрузки, оз. Выгозеро относилось к семейству уязвимости ИБ, что указывает на благоприятные условия формирования водности и



качества воды, а, следовательно, на меньшую уязвимость к изменению параметров режимов. Оз. Выгозеро соответствовало I классу уязвимости, то есть обладало максимальной устойчивостью к изменению качества воды и трофического статуса, что объяснялось высокой загрязненностью воды и антропогенной эвтрофикацией, а как уже говорилось, наиболее устойчивы к изменению какого-либо свойства являются те системы, которые уже в значительной степени обладают этим свойством;

– в период 1980 – 2007 гг. во время спада производства и работы очистной станции оз. Выгозеро относилось к семейству уязвимости IB, что указывает на благоприятные условия формирования водности и качества воды, а, следовательно, на меньшую уязвимость к изменению параметров режимов. Оз. Выгозеро соответствовало I классу уязвимости, то есть обладало максимальной устойчивостью к изменению качества воды и трофического статуса, что объясняется хоть и слабой, но загрязненностью вод, а также большой площадью поверхности водоема.

Из этого можно сделать вывод о том, что в большей степени на величину устойчивости озера влияли изменения в уровне загрязненности и эвтрофикации, а не увеличение площади поверхности водоема или изменение других физико-географических и морфометрических характеристик.

Анализ оценки устойчивости на основе метода сводного показателя

На рисунке 2 показана динамика временного изменения интегрального показателя устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима оз. Выгозеро

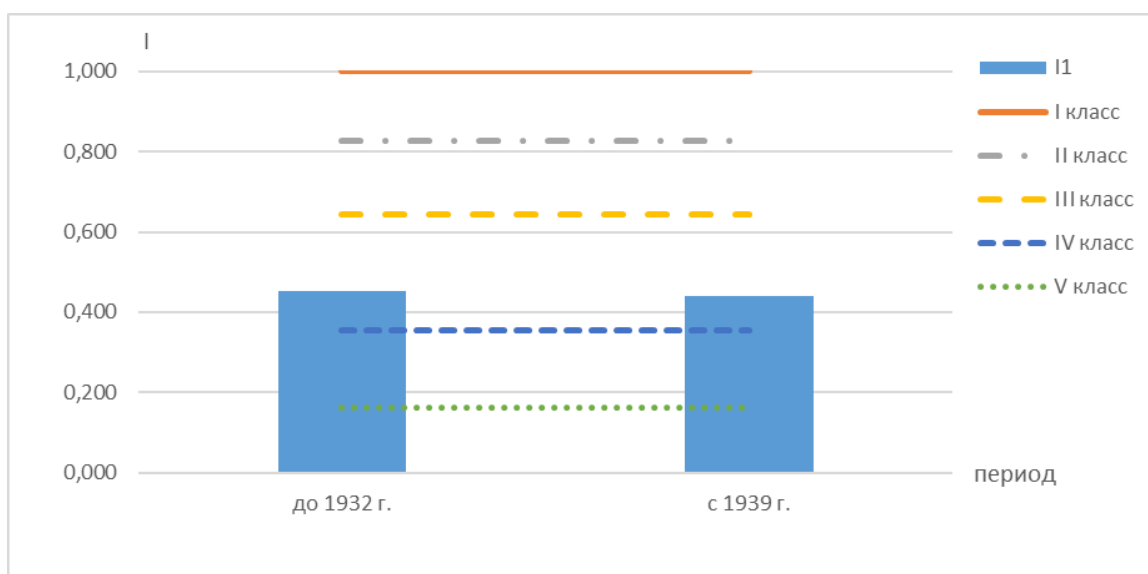


Рисунок 2 – Динамика изменения интегрального показателя устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима оз. Выгозеро

Анализ динамики изменения интегрального показателя устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима оз. Выгозеро показал, что устойчивость к изменению параметров естественного режима оз. Выгозеро в разные периоды своего формирования соответствует III классу устойчивости, значения интегрального показателя не сильно отличаются и равны 0,452 в период до 1932 г. и 0,441 после 1939 г. с возникновением антропогенных воздействий, значения интегрального показателя находятся близко к середине III класса.

На рисунке 3 показана динамика временного изменения интегрального показателя устойчивости водоема к изменению качества воды оз. Выгозеро.

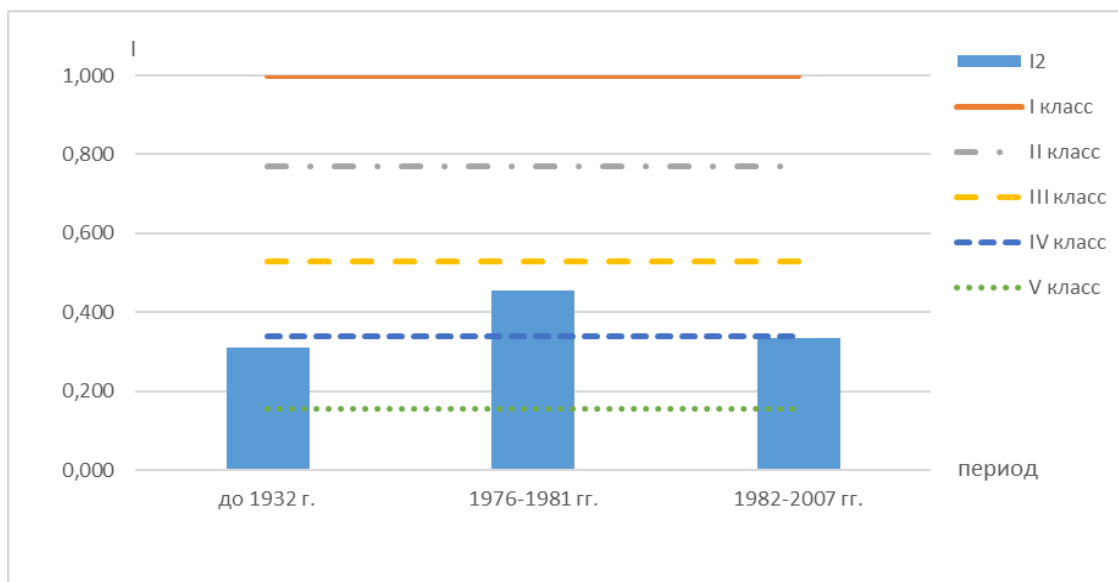


Рисунок 3 – Динамика изменения интегрального показателя устойчивости водоема к изменению параметров качества воды оз.Выгозеро

Анализ исходных данных и динамики изменения интегрального показателя устойчивости водоема к изменению параметров качества воды оз. Выгозеро показал, что диапазон изменений интегрального показателя устойчивости водоема к изменению качества воды в разные периоды формирования оз. Выгозера лежит в пределах 0,311-0,455, охватывая при этом два класса устойчивости к изменению качества воды. В период до 1932 г. вода соответствует II классу качеству воды, значение интегрального показателя равно 0,311, водоем соответствует IV классу устойчивости (ниже средней) к изменению качества воды. В период 1976-1981 гг. вода соответствовала IV классу качества воды, значение интегрального показателя равно 0,455, водоем соответствовал III классу устойчивости (средняя) к изменению качества воды. В период 1982-2007 гг. вода соответствует III классу качества воды, значение интегрального показателя равно 0,334, водоем соответствует IV классу устойчивости (ниже средней) к изменению качества воды и находился на границе III и IV классов. В периоды до 1932 г. и 1982-2007 гг. вода относилась к более высокому классу качества воды, чем в период 1976-1981 гг., но значения интегрального показателя устойчивости

водоема к изменению качества воды были меньше, а, следовательно, оз. Выгозеро обладало меньшей устойчивостью, из этого можно сделать вывод о том, что высокая устойчивость экосистемы не говорит о ее благополучии.

На рисунке 4 показана динамика временного изменения интегрального показателя устойчивости водоема к эвтрофированию оз. Выгозеро.

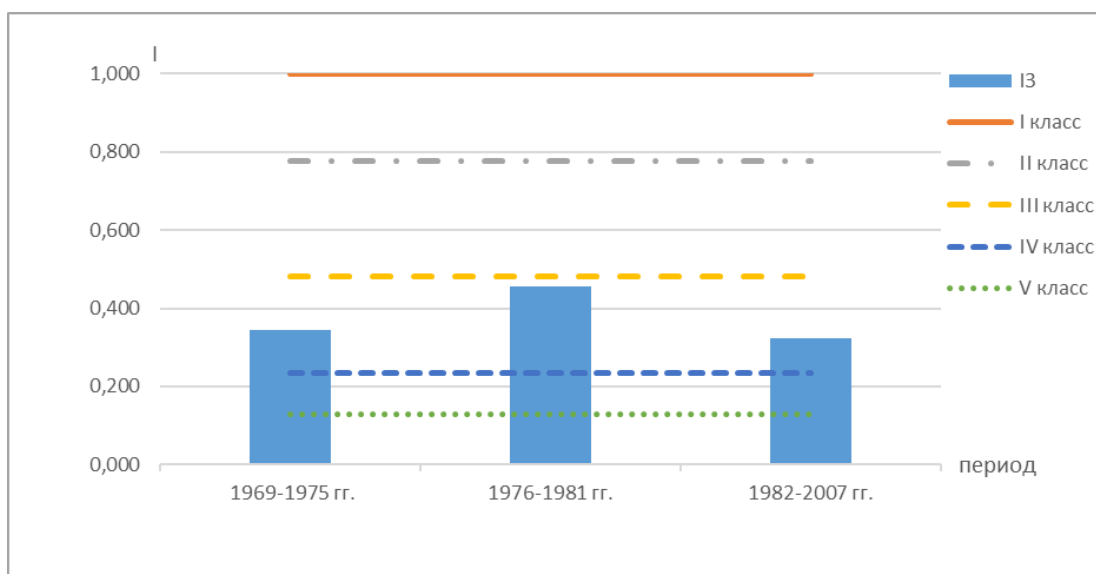


Рисунок 4 – Динамика изменения интегрального показателя устойчивости водоема к эвтрофированию оз. Выгозеро

Анализ исходных данных и динамики изменения интегрального показателя устойчивости водоема к эвтрофированию оз. Выгозеро показал, что несмотря на то, что в разные периоды своего формирования оз. Выгозеро соответствует одному классу устойчивости к эвтрофированию (III), значения интегрального показателя различны. В период 1969-1975 гг. водоем по трофическому статусу относится к мезо-олиготрофному, значение интегрального показателя равно 0,343 и находится почти посередине III и IV классов. В период 1976-1981 гг. водоем по трофическому статусу относится к эвтро-мезотрофному, значение интегрального показателя равно 0,456 и находится на границе III и IV классов. В период 1983-2007 гг. водоем по трофическому статусу относится к мезо-олиготрофному, значение

интегрального показателя равно 0,324. Из этого можно сделать вывод о том, что в период 1975-1982 гг. при более высоком значении интегрального показателя водоем обладал наибольшей своей устойчивостью.

На рисунке 5 показана динамика временного изменения сводного показателя устойчивости к изменению параметров естественного режима и к изменению качества воды оз. Выгозеро.

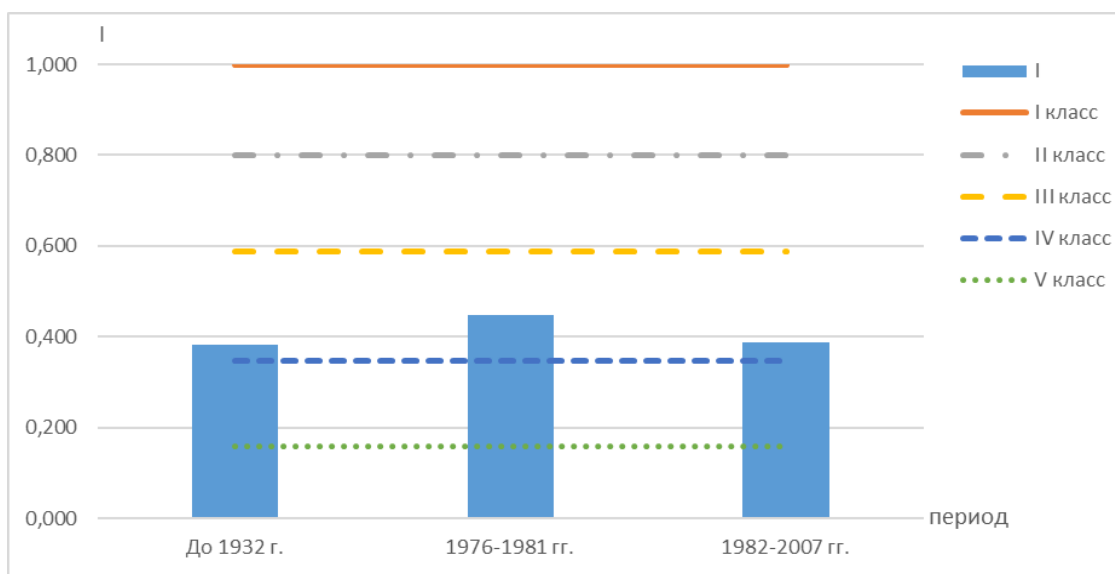


Рисунок 5 - Динамика изменения сводного показателя устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима и к изменению качества воды оз. Выгозеро

Анализ динамики изменения сводного показателя устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима и к изменению качества воды оз. Выгозеро показал, что в периоды до 1932 г. и 1982-2007 гг. значения сводного показателя устойчивости равны 0,382 и 0,388 соответственно и находятся ближе к границе IV класса. В период 1976-1981 гг. значение сводного показателя устойчивости равно 0,448 и находится ближе к середине III и IV классов, следовательно, в этот период водоем обладает наибольшей устойчивостью к изменению параметров естественного режима и к изменению качества воды. Эти различия обусловлены тем, что в

период 1976-1981 гг. вода оз. Выгозеро была наиболее загрязнена и подвержена различным антропогенным воздействиям.

На рисунке 6 показана динамика временного изменения сводного показателя устойчивости к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию оз. Выгозеро.

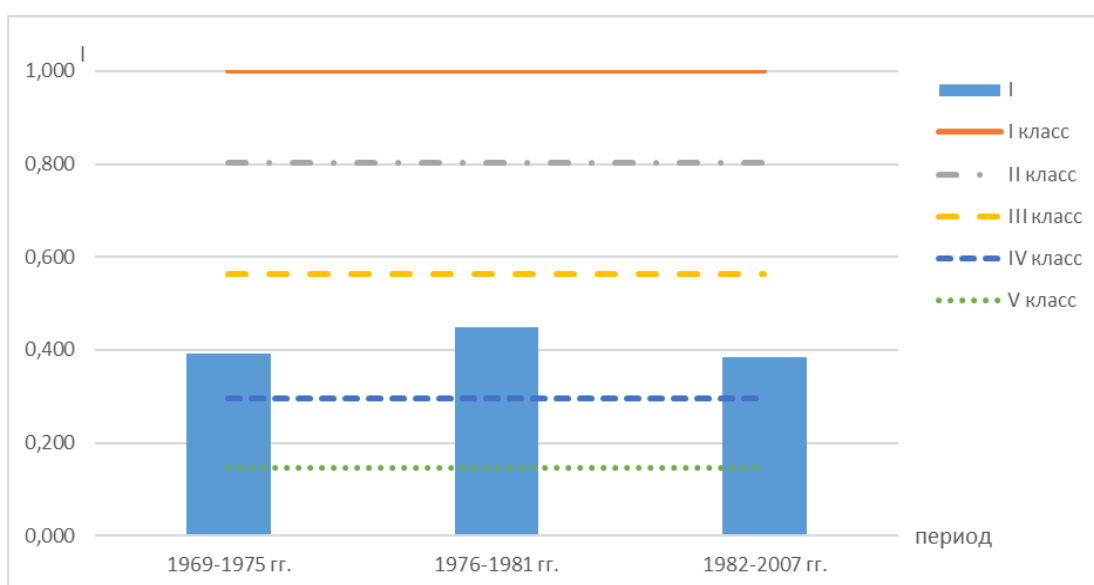


Рисунок 6 - Динамика изменения сводного показателя устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию оз. Выгозеро

Анализ динамики изменения сводного показателя устойчивости водоема к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию оз. Выгозеро показал, что несмотря на то, что в разные периоды своего формирования оз. Выгозеро соответствует одному классу устойчивости к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию (III), значения интегрального показателя различны. В периоды 1969-1975 гг. и 1982-2007 гг. значения сводного показателя устойчивости равно 0,392 и 0,382 соответственно, в эти периоды не наблюдалось биогенной нагрузки на водоем. В период 1976-1981 гг. значение сводного показателя устойчивости равно 0,449 и находится ближе к границе III класса, это обусловлено тем, что

именно в этот период оз. Выгозеро испытывало большую биогенную нагрузку в связи с запуском СБО на Сегежском целлюлозно-бумажном комбинате.

## Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Были рассмотрены и обобщены основные методы и подходы к оценке устойчивости экосистем. В результате анализа литературных источников было выявлено, что все еще нет единого подхода к интегральной количественной оценке устойчивости, а также большинство методов основано на балльно-индексном подходе. Большинство исследователей делят все методы количественной оценки устойчивости на две группы: к первой относятся методы, рассматривающие устойчивость к различным возмущениям, а ко второй – поиски некоторого критерия качества окружающей среды.

2. По результатам обзора литературных данных о состоянии и изменении параметров оз. Выгозеро «до» и «после» антропогенной нагрузки на водоем можно выделить условно три основных этапа формирования водоема:

первый – до антропогенной нагрузки на Выгозеро (до 1932 г.), при котором площадь поверхности составляла 560 км<sup>2</sup>, объем – 3,5 – 4,2 км<sup>3</sup>, а вода соответствовала II – III классу качества воды с трофическим статусом – олиготрофный;

второй – после включения Выгозера в трассу Беломорско-Балтийского канала в 1934г., путем превращения его в водохранилище и постройки в 1939 г. Сегежского ЦБК, а также ввода в эксплуатацию СБО значительно изменились как количественные, так и качественные показатели состояния водоема – площадь поверхности увеличилась почти в два раза и составляла 1250 км<sup>2</sup>, также увеличился объем – 6,5 км<sup>3</sup>, вода стала загрязнена сточными водами СЦБК, класс качества воды понизился до V – грязные, а после ввода станции биологической очистки водоем подвергся эвтрофированию, и относился к эфтрофному-мезотрофному;



третий – после снижения производственной мощности ЦБК в современном состоянии водоем восстанавливается, вода соответствует III классу качества воды – слабозагрязненная, а по трофическому статусу большая часть водоема относится к олиготрофному.

3. В работе были разработан интегральный индекс для оценки устойчивости водоемов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов. Построение интегральных показателей было проведено на основе метода сводных показателей. Разработанный интегральный индекс позволил провести оценку устойчивости оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и качества воды по заданным параметрам.

4. Оценка устойчивости на основе балльно-индексной методики и метода сводного показателя выполнена на оз. Выгозеро в разные периоды формирования водоема.

По результатам оценки устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов на основе балльно-индексной методики выявлено оз. Выгозеро стало более устойчивым после воздействия на него антропогенных факторов, в частности действия сточных вод СЦБК. В период до 1932 г. в своем естественном состоянии оз. Выгозеро соответствовало III классу уязвимости, обладая средней устойчивостью, в периоды 1965 – 1978 гг. и 1980 – 2007 гг. оз. Выгозеро соответствовало I классу уязвимости, обладая максимальной устойчивостью. Таким образом, можно сделать вывод, что антропогенное воздействие на водоем привело к снижению его уязвимости.

В целом, анализ оценки устойчивости к изменению параметров режимов, проведенный на основе многокритериальной методики, показал, что:

– в природном состоянии до 1932 г. устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды соответствует III классу устойчивости ( $I_1=0,382$ ); устойчивость оз. Выгозеро

к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию соответствует III классу устойчивости ( $I_{II}=0,392$ ).

– в период 1969 – 1975 гг. устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды соответствует III классу устойчивости ( $I_I=0,448$ ); устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию соответствует III классу устойчивости ( $I_{II}=0,392$ ).

– в период 1976 – 1981 гг. устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды соответствует III классу устойчивости ( $I_I=0,448$ ); устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию соответствует III классу устойчивости ( $I_{II}=0,449$ ).

- в период 1982 – 2007 гг. устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды соответствует III классу устойчивости ( $I_I=0,388$ ); устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и к эвтрофированию соответствует III классу устойчивости ( $I_{II}=0,383$ ).

5. Балльно-индексная методика позволяет оценить устойчивость при небольшом количестве исходных данных, а также является экспресс-методом для оценки устойчивости систем. Метод сводных показателей же позволяет на основе существующих классификаций разработать шкалы интегральной оценки свойств системы по большому перечню критериев, выбираемых самим исследователем в каждой конкретной ситуации. МСП также позволяет проследить пространственно-временную динамику изменений как между классами, так и внутри одного класса.

## Список использованных источников

1. Арманд А.Д. Механизмы устойчивости геосистем // Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М., 1989. С.33-46.
2. Вислянская И.Г., 1978. Фитопланктон Выгозерского водохранилища / Гидробиология Выгозерского водохранилища. Петрозаводск: КФ АН СССР. Ред. В. Соколова. С. 15-42.
3. Гречушникова М.Г. Научно-популярная энциклопедия «Вода России» – Выгозеро озеро [Электронный ресурс] / М.Г. Гречушникова. – Электрон. текстовые дан. – Москва. – Режим доступа: [http://water-ru.ru/Водные\\_объекты/Выгозеро](http://water-ru.ru/Водные_объекты/Выгозеро), свободный.
4. Дмитриев В. В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера. 2010. Т. 2, № 3. С. 507–520.
5. Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы. Научно-теоретический журнал «Общество. Среда. Развитие». №4 (12), 2009, - С.146-165.
6. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем // Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2014, № 4.
7. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. – СПб., 2004. – 294 с.
8. Кабранова А.И. Водный баланс Выгозерско-Ондского водохранилища // Сб. работ ЛГМО. Вып. 11. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 78–93.
9. Красовский А.А, Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. - М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. -599 с.
10. Крупнейшие озера - водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных

- воздействиях. Филатов Н.Н., Н.М. Калинкина, Т.П. Куликова, А.В. Литвиненко, П.А. Лозовик. // Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2015. 375 с.
11. Литвиненко А.В., Филатов Н.Н., Богданова М.С., Карпечко В.А., Литвинова И.А. Антропогенная трансформация и хозяйственное использование озера Выгозеро. Водные ресурсы. Том 41. № 4. 2014. С. 419-429 (RISC).
  12. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. - М.: Гостехиздат: 1950. -472 с.
  13. Озера Карелии [Электронный ресурс] : справочник / ВОО "Рус. геогр. о-во", отд-ние РГО в Респ. Карелии, Ин-т вод. проблем Севера КарНЦ РАН. - Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2013 (2015). - 463 с.
  14. Примак Е.А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. географ. наук. СПб, 2009 - 24 с.
  15. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. - 637 с.
  16. Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Устойчивость гидроэкосистем: обзор проблемы // Аридные экосистемы. – 2014. – Т.4, № 4 (61).
  17. Рябчиков А.М. Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. - М.: Мысль, 1972. - 223 с.
  18. Светлосанов В.А. Устойчивость природных систем к природным и антропогенным воздействиям (учебное пособие). М., 2009. – 100 с.
  19. Свирежев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. – 190 с.
  20. Филатов Н.Н., Н.М. Калинкина, Т.П. Куликова, А.В. Литвиненко, П.А. Лозовик. Крупнейшие озера - водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. // Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2015. - 375 с.
  21. Элтон Ч.С. Экология нашествия животных и растений. - М.: Иностран. лит-ра, 1960. - 230 с.

22. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. -// IIASA. Research report Austria. - R-R-73-3, 1973 -23 p.
23. Svetlosanov V.A. The notions of the indexes and criterion for a measurement of ecosystem stability.//Ecology (CSSR). - 1984. -№ 2.