



Research Article









Received: September 27, 2025

Accepted: November 15, 2025

Published: December 20, 2025

ISSN 2304-6295

Assessment of the impact of hydraulic engineering construction materials on the environmental safety of aquaculture facilities

Levkina, Elena Vladimirovna¹  
Gusev, Evgeny Georgievich²  
Shishkareva, Natalya Valerievna²  
Larkina, Elena Viktorovna²  

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation; levkina.ev@dvmfu.ru (L.E.V.)

² Vladivostok Branch of the Russian Custom Academy, Vladivostok, Russian Federation; gusev.eg@bk.ru (G.E.G.); shishkaryovaNV@msun.ru (S.N.V.)

Correspondence: *e-mail: levkina.ev@dvmfu.ru; contact phone [+79025553330](tel:+79025553330)

Keywords:

Hydraulic Engineering Materials; Environmental Safety; Fisheries; Ecosystems; Pollution

Abstract:

The research purpose is to scientifically substantiate and develop an integrated approach to hydraulic structures of the fisheries complex by introducing environmentally neutral building materials (in particular, geopolymer concretes) and improving the regulatory and methodological framework for assessing their impact on aquatic ecosystems.

The study hypothesis is that the replacement of traditional hydraulic engineering materials based on Portland cement and toxic polymers with geopolymer composites and environmentally inert structures will stabilize the hydrochemical parameters of the aquatic environment (in particular, the pH level), eliminate the migration of toxic ions and heavy metals, which, together with the introduction of bioengineering solutions, will ensure the sustainable functioning of fisheries ecosystems and the conservation of biodiversity.

The authors have developed an expanded classification of hydraulic engineering materials that takes into account not only physical strength, but also the potential for chemical migration of toxicants and their effect on the hydrochemical regime. The scientific article systematizes the factual data on the negative impact of non-ecological materials on the ichthyofauna (death of juveniles, degradation of spawning grounds, accumulation of metals), confirming the need to revise approaches to the design of hydraulic structures.

When verifying the hypothesis, the superiority of geopolymer concrete over its traditional Portland cement counterpart in fishing conditions has been scientifically substantiated: pH stability (7.5–8.5), immobilization of heavy metals in the matrix, and the absence of the need for toxic additives.

1 Introduction

Одним из ключевых аспектов обеспечения экологической безопасности рыбохозяйственного комплекса является воздействие гидротехнических конструкций [1] и материалов [2] на экосистемы рыбоводных объектов. Именно от выбора и применения этих материалов зависит не только техническая надёжность сооружений, но и устойчивость водной среды, здоровье икhtiофауны и сохранение природного биоразнообразия и как следствие экологическая безопасность водных систем и стратегическая экономическая безопасность рыбохозяйственного комплекса. Грамотный технологический подход, сочетающий экологическую ответственность с экономической целесообразностью, позволяет минимизировать антропогенную нагрузку на водоёмы и обеспечить долгосрочную устойчивость как рыбоводных хозяйств, так и окружающих экосистем.

Levkina, E.; Gusev, E.; Shishkareva, N.; Lar'kina, E.

Assessment of the impact of hydraulic engineering construction materials on the environmental safety of aquaculture facilities; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 120 Article No 12007. doi: 10.4123/CUBS.120.7



К числу гидротехнических сооружений рыбохозяйственного комплекса относятся прудовые дамбы, водоподводящие и водосбросные каналы, садковые установки, фильтрующие насыпи, берегоукрепления, лотки нерестилищ, которые обеспечивают регулирование гидрорежима, создание среды обитания, защиту от эрозии и обеспечение технологического цикла выращивания гидробионтов. Однако, материалы, из которых они изготовлены, могут оказывать прямое и опосредованное воздействие на водные экосистемы, включая химическое, физическое и биологическое влияние.

В таблице 1 представлены основные группы гидротехнических материалов и обобщённые источники их воздействия на отраслевые комплексы.

Таб.1– Основные группы гидротехнических материалов и их источники воздействия
Tab.1– Main groups of hydraulic engineering materials and their sources of impact

Группа материалов	Примеры	Основные воздействия на экосистему
Бетоны и цементные композиты [3-6]	Тяжёлый бетон, сборные железобетонные конструкции	Щелочное выщелачивание (\uparrow pH), вымывание Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , тяжёлых металлов (Cr, V, As при использовании отходов), изменение ионного баланса воды
Полимерные материалы [3, 7]	плёнки, геомембраны, садковые сетки, трубы	Выщелачивание стабилизаторов (например, фталатов), УФ-деградация с образованием микропластика, адсорбция органических загрязнителей на поверхности [11]
Металлические конструкции [8]	Арматура, крепёж, каркасы садков	Коррозия - вымывание Fe, Zn, Cu, Ni; локальное снижение pH; токсичность ионов для планктона и икры [12]
Природные материалы [10]	Щебень, гравий, древесина, глина	Минимальное химическое воздействие, но возможна эрозия, заиление, изменение гранулометрического состава дна [13]
Композитные и модифицированные материалы	Бетоны с золошлаками, геополимеры, полимербетоны	Зависит от состава: потенциальный риск выщелачивания токсикантов из отходов или добавок [14]

Однако для обеспечения комплексного подхода к экономически обоснованной экологической безопасности рыбохозяйственного комплекса требуется более глубокая детализация, в частности, рассмотрение специфики антропогенного воздействия, обусловленного именно применением гидротехнических материалов, а также документально подтверждённых фактов их влияния на водные экосистемы.

Цель исследования - научное обоснование и разработка комплексного подхода к гидротехническим сооружениям рыбохозяйственного комплекса путем внедрения экологически нейтральных строительных материалов (в частности, геополимерных бетонов) и совершенствования нормативно-методической базы оценки их воздействия на водные экосистемы.

Задачи исследования:

- провести системный анализ существующих групп гидротехнических материалов (бетоны, полимеры, металлы, композиты) и классифицировать их по степени потенциального экологического риска для ихтиофауны;

- выявить и документально подтвердить механизмы прямого и косвенного антропогенного воздействия материалов на гидрохимический режим и биоценозы рыбохозяйственных водоемов (аналитический период 2017–2025 гг.);

- сравнить эксплуатационные и экологические характеристики традиционного портландцементного бетона и разработанного геополимерного композита в условиях водной среды [15,16];
- разработать методику оценки экологической безопасности материалов с учетом хронического, сублетального воздействия и факторов старения;
- сформировать комплекс мер и рекомендаций по минимизации негативного воздействия строительных материалов на экосистемы рыбоводных объектов (принципы «зеленого строительства», биоинженерные решения).

2 Materials and Methods

В ходе выполнения исследования использовался проектный инструментарий: группировка гипотезы о существовании проблем. Наряду с проектным инструментарием применялись общенаучные (анализ, синтез) методы исследований, которые позволили обеспечить достоверность результатов исследования и обоснованность выводов. Так, системный анализ применялся для изучения взаимосвязи между типом строительного материала, условиями эксплуатации и состоянием водной экосистемы. Сравнительный анализ позволил сопоставить химические и физические свойства портландцементных и геополимерных бетонов (уровень выщелачивания, щелочность, коррозионная стойкость). Ретроспективный анализ применялся для обработки данных о техногенных инцидентах и случаях загрязнения водоемов (2017–2025 гг.), зафиксированных в отчетах надзорных ведомств (Росрыболовство, Росприроднадзор, ВНИРО).

Исходные материалы для изготовления геополимерных бетонов:

- золошлаковая материалы (ЗШМ) - от ТЭС, работающей на каменном угле; основные компоненты: $\text{SiO}_2 = 52,3$ мас.%, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 28,1$ мас.%, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,8$; соответствует ГОСТ 25818-2017;
- наночастицы магнетита Fe_3O_4 , полученные химическим осаждением в щелочной среде; средний размер 25 нм, удельная поверхность $45 \text{ м}^2/\text{г}$;
- кварцевый песок - фракция 0,16–2,5 мм, соответствующий ГОСТ 8736-2014;
- щелочной активатор - смесь 10 М NaOH и жидкого стекла (модуль 2,8) в соотношении, обеспечивающем $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,20$.

Методика получения геополимеров:

1. Сухие компоненты (ЗШМ, песок, Fe_3O_4) смешивали в лабораторном смесителе.
2. Добавляли щелочной активатор и воду до водоцементного отношения 0,38.
3. Формовали кубы размером $100 \times 100 \times 100$ мм (рисунок 1) и призмы размером $40 \times 40 \times 160$ мм.
4. Выдерживали 24 ч в формах при 20°C , затем 27 сут в воздушно-сухих условиях.



Рис.1 – Образцы геополимеров (Иллюстрация выполнена авторами)

Fig.1 – Samples of geopolymers

Испытания геополимеров на прочность при сжатии и изгибе проводились по методикам, адаптированным из стандартов для цементных материалов (ГОСТ 10180, ГОСТ 310.4, ASTM C109/C348). Испытания на сжатие выполнялись на гидравлическом прессе с постоянной скоростью нагружения $0,5\text{--}0,6 \text{ МПа/с}$ до разрушения образца, а испытания на изгиб проводились на призмах $40 \times 40 \times 160$ мм со скоростью нагружения 50 Н/с ; все результаты фиксировались с

Levkina, E.; Gusev, E.; Shishkareva, N.; Lar'kina, E.

Assessment of the impact of hydraulic engineering construction materials on the environmental safety of aquaculture facilities; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 120 Article No 12007. doi: 10.4123/CUBS.120.7

точностью до 0,1 МПа, а за окончательное значение принималось среднее арифметическое не менее трех параллельных образцов при отклонении каждого результата не более чем на 15% от среднего (рисунок 2). Модуль упругости вычислялся как отношение нормального напряжения к относительной деформации.



Рис.2 – Испытание геополимеров на прочность:
а) при сжатии, б) при изгибе (Иллюстрация выполнена авторами)
Fig.2 – Testing of geopolymers for strength: a) in compression, b) in bending

3 Results and Discussion

Гидротехнические материалы (бетоны, полимеры, металлы, геосинтетики и др.), используемые при строительстве плотин, дамб, берегоукреплений, водозаборных узлов и прудовых систем, могут оказывать как прямое (химическое, физическое), так и косвенное (гидрологическое, биоценологическое) воздействие на среду обитания гидробионтов. Без учёта этих факторов невозможно достичь баланса между инженерной эффективностью сооружений и сохранением экологической устойчивости рыбоводных объектов. Поэтому целесообразно дополнить общую классификацию из таблицы 1 специализированным анализом, включающим:

- типы гидротехнических материалов и их потенциальную токсичность;
- механизмы взаимодействия материалов с водной средой [17];
- конкретные случаи негативного воздействия на акватории (реки, озёра, водохранилища, прудовые хозяйства) [18];
- последствия для популяций ценных промысловых и воспроизводимых видов.

Таб. 2 – Антропогенное воздействие гидротехнических материалов и сооружений на водные экосистемы рыбохозяйственного комплекса
Table 2 – Anthropogenic impact of hydraulic engineering materials and structures on aquatic ecosystems of the fisheries complex

Проблема в обеспечении экологической безопасности	Тип загрязнения	Антропогенное воздействие на водные экосистемы	Факт антропогенного воздействия (2017-2025 годы)	Пути решения
Применение неэкологичных гидротехнических материалов	Химическое воздействие	Выщелачивание щелочей из бетона, миграция пластификатор	В 2020 г. при реконструкции плотины на р. Сестра (Ленинградская	Использование инертных, нетоксичных и биосовместимых материалов (бетон



		ов из полимеров, коррозия металлов	область) выявлено превышение рН до 9,8 в нижнем бьефе; зафиксирована гибель молоди сига. Причиной стало использование нестабилизированного бетона без защитного покрытия (Росрыболовство, Отчёт по инциденту № СЗ-2020/47) ¹	с нейтральным рН, экологически чистые геосинтетика, композиты на основе природных наполнителей)
Нарушение естественного гидрологического режима [19]	Физическое воздействие	Изменение скорости течения, уровня воды, температурного и кислородного баланса — негативное влияние на нерест, рост и выживаемость рыб	В 2022 г. на Камском водохранилище (Пермский край) из-за несвоевременного сброса воды весной было затоплено менее 15% традиционных нерестилищ щуки и язя. Это связано с эксплуатацией ГЭС без учёта экологических графиков (Научный отчёт ФГБНУ «ВНИРО», 2023, с. 34) ²	Внедрение биоинженерных решений; проектирование ГТС с учётом гидрологических особенностей водоёма; организация искусственных нерестилищ
Упрощение структуры донных и прибрежных сред [20]	Биологическое воздействие Химическое воздействие	Деградация бентосных и перифитонных сообществ — ослабление основы пищевой цепи в искусственных водоёмах	В 2019 г. в рыбопитомнике ООО «Волжский осётр» (Волгоградская область) после замены берегоукреплений на бетонные плиты биомасса зообентоса снизилась на 65%. Исследование выполнено по заказу Росприроднадзора (Отчёт ФБУ «Росгидрохим», № ВГ-19/212) ³	Комбинирование жёстких конструкций с естественными субстратами (камень, древесина, растительность); создание благоприятных условий для развития микрофлоры и фауны
Отсутствие или неэффективнос	Физико воздействие	Блокирование миграционных	В 2021 г. на Красноярской ГЭС	Обязательное проектирование и

¹ Росрыболовство. Информационный отчёт по экологическому инциденту на реке Сестра (Ленинградская область). № СЗ-2020/47. — СПб, 2020. Доступ: <https://sz.fisheries.gov.ru> (раздел «Контроль и надзор»)

² ФГБНУ «ВНИРО». Экологическое состояние нерестилищ в бассейне реки Кама: итоги мониторинга 2022–2023 гг. — М., 2023. — С. 34. <https://www.vniro.ru/>

³ ФБУ «Росгидрохим». Лабораторные исследования донных отложений и биоты в рыбопитомнике «Волжский осётр». Отчёт № ВГ-19/212. — Волгоград, 2019. Цитируется в материалах Росприроднадзора по Волгоградской области.



ть рыбозащитных устройств		путей, травмирование рыбы, снижение генетического разнообразия популяций	выявлено, что до 30% молоди нельмы повреждается при проходе через водозаборные решётки. Инцидент зафиксирован в ходе мониторинга ПАО «РусГидро» (Отчёт по экологической безопасности, 2021, с. 18) ⁴	установка эффективных рыбозащитных и рыбоходных сооружений, соответствующих биологическим потребностям местных видов
Недостаточный контроль за состоянием водной среды	Биологическое воздействие	Накопление токсичных веществ, снижение качества среды обитания, массовая гибель гидробионтов	В 2023 г. в акватории озера Имандра (Мурманская область), где расположен форелевый завод, обнаружено превышение ПДК меди (в 2,3 раза) и цинка, при этом источником признаны корродированные металлические опоры садков (Роспотребнадзор, Протокол отбора проб № 51/2023) ⁵	Постоянный экологический мониторинг параметров воды и состояния ихтиофауны; раннее выявление и устранение негативных тенденций
Несоблюдение нормативных требований при строительстве и эксплуатации	Химическое воздействие	Юридические и экологические риски, ухудшение репутации хозяйствующег о субъекта, утрата лицензий	В 2022 г. рыбоводный участок на р. Амур (Хабаровский край) приостановил работу по предписанию Росприроднадзора из-за применения полимерной плёнки без подтверждения экобезопасности (решение № ДВ- 22/89). Лабораторные анализы выявили фталаты в концентрациях, превышающих ПДК	Строгое соблюдение санитарно- эпидемиологическ их и природоохранных норм на всех этапах жизненного цикла объекта

⁴ ПАО «РусГидро». Отчёт по экологической безопасности Красноярской ГЭС за 2021 год. — Красноярск, 2021. — С. 18. <https://www.rushydro.ru/sustainability/reports/>

⁵ Управление Роспотребнадзора по Мурманской области. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2022 году» https://mpr.gov-murman.ru/activities/napravleniya/gosudarstvennyu-okhotnichiy-nadzor/2023.06.29_doklad_za_2022_god_-_1_.pdf

Levkina, E.; Gusev, E.; Shishkareva, N.; Lar'kina, E.

Assessment of the impact of hydraulic engineering construction materials on the environmental safety of aquaculture facilities; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 120 Article No 12007. doi: 10.4123/CUBS.120.7

			в 4 раза (Росприроднадзор, 2022) ⁶	
--	--	--	-----------------------------------------------------	--

Отмечен факт, что действующие нормативные документы не учитывают хроническое, сублетальное и экосистемное воздействие, что требует разработки комплексной методики оценки экологической безопасности гидротехнических материалов с учётом:

- длительности контакта,
- температуры и минерализации воды,
- чувствительности целевых видов рыб,
- способности материала к старению и деградации.

Таким образом, гидротехнические материалы, несмотря на свою функциональную необходимость, являются потенциальным источником антропогенной нагрузки на экосистемы рыбоводных объектов. Их воздействие носит многофакторный характер и требует системного подхода к оценке и управлению. Совершенствование механизма обеспечения экологической безопасности рыбохозяйственного комплекса невозможно без научно обоснованной классификации материалов по степени экологического риска, разработки специализированных технических условий и внедрения инновационных композитов, сочетающих прочность, долговечность и экологическую нейтральность. На рисунке 3 представлен пул направлений минимизации негативного воздействия гидротехнических материалов на экосистемы рыбоводных объектов.



Рис.3 – Пути минимизации негативного воздействия гидротехнических материалов на экосистемы рыбоводных объектов (Иллюстрация выполнена авторами)

Fig.3 – Ways to minimize the negative impact of hydraulic engineering materials on the ecosystems of fish farming facilities

В этой связи для обеспечения экологической безопасности рыбохозяйственного комплекса необходимо реализовать комплекс мер, направленных на минимизацию негативного воздействия строительных и эксплуатационных материалов на водную среду и их совместимость с биологическими процессами в водоёмах.

В первую очередь следует переходить на использование «экологически нейтральных» композитов, исключая выделение токсичных веществ в воду. Это достигается за счёт

⁶ Росприроднадзор. Предписание о приостановке деятельности рыбоводного участка на р. Амур. № ДВ-22/89. — Хабаровск, 2022. <https://epr.rpn.gov.ru>



применения инертных заполнителей, отказа от химических добавок, опасных для гидробионтов, а также замены традиционного портландцемента на геополимерные вяжущие, обладающие низкой щелочностью и минимальной миграцией ионов в водную среду.

В качестве примеров были изготовлены четыре образца геополимерного композита (образцы № 1–4) по единой методике с варьированием содержания наночастиц Fe_3O_4 и соотношения компонентов в пределах, указанных в формуле изобретения (таблица 3).

Таб. 3 – Составы геополимерных композитов
Table 3 – Compositions of geopolymer composites

Образец	Содержание кварцевого песка, мас. %	Содержание Fe_3O_4 , мас. %	Основа (ЗШС), мас. %
1	69,5	0,5	30
2	58,5	1,5	40
3	53,0	2,0	45
4 (контрольный)	60,0	0,0	40

Результаты исследования физико-механических свойств геополимеров приведены в таблице 4.

Таб. 4 – Составы геополимерных композитов
Table 4 – Compositions of geopolymer composites

Показатели (28 сут)	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4 (контрольный)
Прочность на сжатие, МПа	48	51	50	49
Прочность на изгиб, МПа	6,2	6,8	6,7	6,0
Модуль упругости, ГПа	31	33	32	29

Полученные результаты свидетельствуют о пригодности разработанных экологически безопасных геополимерных материалов для использования в гидротехнических сооружениях рыбохозяйственного комплекса.

Геополимерный бетон является более экологичным по сравнению с традиционным портландцементным бетоном не только на этапе производства, но и в процессе эксплуатации, особенно в условиях контакта с водной средой, что критически важно для гидротехнических сооружений рыбохозяйственного комплекса:

1. Отсутствие или резкое снижение щелочного выщелачивания. Портландцементный бетон содержит значительное количество свободного гидроксида кальция $Ca(OH)_2$ и щелочных ионов (Na^+ , K^+). При контакте с водой (особенно пресной) происходит интенсивное выщелачивание, вызывающее:

- повышение pH воды до 9–12;
- нарушение кислотно-щелочного баланса в водоёме;
- усиление токсичности аммиака (NH_3), нитритов и тяжёлых металлов;
- гибель икры, личинок и зоопланктона.

Геополимерный бетон формируется в результате реакции щелочной активации алюмосиликатного сырья (зола, шлак, метакаолин) без образования $Ca(OH)_2$. Его структура - трёхмерная алюмосиликатная сеть - химически стабильна в нейтральной и слабощелочной среде, поэтому pH выщелачиваемой воды обычно находится в пределах 7,5–8,5, что соответствует нормам СанПиН 2.1.5.980-00 для рыбохозяйственных водоёмов.

2. Минимальное выделение токсичных ионов. В цементном бетоне возможны примеси хрома (Cr^{6+}), ванадия, мышьяка - особенно при использовании промышленных добавок. Геополимеры, особенно на основе золошлаковых смесей, при правильной технологии фиксации тяжёлых металлов в стекловидной матрице, снижают их подвижность. Металлы включаются в кристаллическую решётку геополимера и не выщелачиваются даже при длительном контакте с водой.

Исследования [21-22] показывают, что степень выщелачивания Pb, Cd, Cr из геополимеров на 60–90% ниже, чем из цементных композитов.

3. Высокая химическая устойчивость в агрессивных средах. Геополимеры обладают повышенной устойчивостью к:

- сульфатной коррозии,



- углекислотной агрессии,
 - биогенной коррозии (деятельность микроорганизмов).
- Это снижает деградацию материала в воде, предотвращая:

- образование взвешенных частиц,
 - вымывание микрокомпонентов,
 - необходимость частого ремонта (что само по себе создаёт экологическую нагрузку).
4. Отсутствие необходимости в токсичных добавках. В цементные бетоны часто вводят:
- нитриты/нитраты (противоморозные добавки),
 - хлориды (ускорители твердения),
 - пластификаторы на основе нафталин- или меламиноформальдегидных смол.

Эти вещества токсичны для гидробионтов даже в следовых концентрациях.

Геополлимерные системы не требуют таких добавок: регулирование реологии достигается за счёт состава щелочного активатора (силикат натрия, гидроксид натрия) и модификации наполнителей. Сами активаторы (NaOH , Na_2SiO_3) могут быть токсичны в жидкой фазе, но в затвердевшем геополлимере они полностью встроены в структуру и не выщелачиваются при $\text{pH} < 10$ [23].

5. Совместимость с биоценозами. Поверхность геополлимерного бетона менее «агрессивна» для колонизации перифитомом и бентосом, чем высокощелочная поверхность цементного бетона. Это способствует формированию естественных биоценозов на конструкциях, что улучшает самоочищающую способность водоёма.

Таб. 5 – Экологические характеристики в эксплуатации [23-24]
Tab.5 – Environmental characteristics in operation

Показатель	Портландцементный бетон	Геополлимерный бетон
рН выщелачиваемой воды	9–12 (первые месяцы)	7,5–8,5 (стабильно)
Выщелачивание Ca^{2+} , Na^+ , K^+	Значительное	Незначительное
Выщелачивание тяжёлых металлов	Возможен вынос примесей	Металлы иммобилизованы в матрице
Необходимость токсичных добавок	Часто требуется	Не требуется
Устойчивость к биокоррозии	Средняя	Высокая
Влияние на икру и планктон	Негативное (из-за высокого рН)	Нейтральное / слабое
Соответствие требованиям СанПиН 2.1.5.980-00	Только после «старения» (6–12 мес.)	Сразу после отверждения

В условиях эксплуатации в водной среде, особенно в рамках рыбохозяйственных объектов, особую актуальность приобретает внедрение инновационных строительных материалов, отвечающих самым высоким экологическим стандартам [25-27]. Геополлимерный бетон представляет собой именно такой новаторский материал: он не нарушает естественный гидрохимический режим водоёмов, не выделяет токсичных веществ, устойчив к деградации и абсолютно безопасен для гидробионтов [28-30].

Эти уникальные свойства делают геополлимерный бетон не просто альтернативой традиционному цементному, а стратегически важным инструментом повышения экологической безопасности всего рыбохозяйственного комплекса. В связи с этим целесообразно инициировать его широкое применение при проектировании и реконструкции гидротехнических сооружений, как ключевой шаг в совершенствовании системы управления, обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития водных экосистем.



4 Conclusions

1. Гидротехнические материалы оказывают комплексное (химическое, физическое, биологическое) воздействие на экосистемы, которое часто недооценивается действующими нормативами, ориентированными лишь на прочность и стоимость.

2. Анализ инцидентов 2017–2025 гг. подтверждает прямую связь между применением неэкологичных материалов (нестабилизованный бетон, корродирующие металлы, токсичные полимеры) и деградацией рыбных популяций (гибель молоди, нарушение нереста, снижение кормовой базы).

3. Геополимерный бетон демонстрирует превосходство над традиционным портландцементным бетоном по ключевым экологическим параметрам: нейтральный pH выщелачиваемой воды, отсутствие токсичных добавок, высокая коррозионная стойкость и совместимость с биоценозами.

4. Требуется пересмотр стандартов строительства в рыбохозяйственных зонах с учётом хронического воздействия материалов и внедрением обязательной эко-экспертизы проектов.

5. Переход к «зелёному строительству», использование природоподобных технологий и постоянный экологический мониторинг являются обязательными условиями для обеспечения долгосрочной обеспечения экологической безопасности рыбохозяйственного комплекса и устойчивого развития водных экосистем.

5 Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interest. The authors made equivalent contributions to the publication.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

References

1. Cox R., Kingsford R., Suthers I., Felder S. (2023). Fish Injury from Movements across Hydraulic Structures: A Review. *Water*. **15**. 1888. <https://doi.org/10.3390/w15101888>.
2. Ivanov, A. & Paremud, S. & Filippov, G. (2004). A Fish Protection System for Maintaining Natural Fish Reproduction under Hydraulic Engineering Construction Conditions. *Power Technology and Engineering*. **38**. 146-150. <https://doi.org/10.1023/B:HYCO.0000041818.95167.fb>.
3. Musa M., Mahmudi M., Lusiana E., Arsad S., Martassha A., Abidah Z., Naba M., Alvionita R., Buwono N. (2025). Comparing microplastic contamination in vannamei shrimp aquaculture: the impact of concrete and HDPE pond materials in Probolinggo, East Java, Indonesia. *Aquaculture International*. **33**. <https://doi.org/10.1007/s10499-025-02050-4>.
4. Kang D.-H., Hunter J., Chirnside A. (2024). Recycled Concrete Aggregate for Oyster Aquaculture. *Waste*. **2**. 201-217. <https://doi.org/10.3390/waste2030012>.
5. Okoliegbe I., Ariole C., Okpokwasili G. (2020). Physico-chemical properties of concrete pond water used for *Clarias gariepinus* aquaculture. *Nature and Science*. **18(6)**. <https://doi.org/10.7537/marsnsj180620.05>.
6. Mostafaeipour A. (2015). The effect of water containing sodium sulfate ions on strength of concrete of aquaculture ponds and channels. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*. **14**. 467-484.
7. Koričan M., Vladimir N. (2026). Review of biodegradable materials for aquaculture nets: Environmental performance and potential to reduce marine plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*. **228**. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119575>.
8. Li N., Shi W., Han X., Li X., Verma A., Liu C., Liu Y. (2023). Dynamic analysis of an integrated offshore structure comprising a jacket-supported offshore wind turbine and aquaculture steel cage. *Ocean Engineering*. **274**. 114059. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114059>.
9. Gao F., Gui F., Feng D., Qu X., Hu F., Yang X. (2023). Study on the Corrosion Behavior of D36 Steel Plate and H62 Copper Alloy Net for Marine Aquaculture Facilities in Simulated Seawater. *Journal of Marine Science and Engineering*. **11**. 975. <https://doi.org/10.3390/jmse11050975>.
10. Bendag S., Barth A., Nitzsche J., Schubert P., Wilke T. (2026). Wood as Alternative Tank Construction Material in Sustainable Shrimp Aquaculture. *Aquaculture Research*. **2026**. <https://doi.org/10.1155/are/8342238>.

Levkina, E.; Gusev, E; Shishkareva, N.; Lar'kina, E.

Assessment of the impact of hydraulic engineering construction materials on the environmental safety of aquaculture facilities; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 120 Article No 12007. doi: 10.4123/CUBS.120.7



11. Mosconi G., Panseri S., Magni S., Malandra R., D'Amato A., Carini M., Chiesa L., Della Torre C. (2023). Plastic Contamination in Seabass and Seabream from Off-Shore Aquaculture Facilities from the Mediterranean Sea. *Journal of Xenobiotics*. **13**. 625-640. <https://doi.org/10.3390/jox13040040>.
12. Wang Y., Chen Z., Wang J., Chang Z., Zhang S., Li J. (2026). Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a Greenhouse Culture Model for *Litopenaeus vannamei*. *Fishes*. **11**. 131. <https://doi.org/10.3390/fishes11030131>.
13. Albicini P., Ferranti M., Asnaghi V., Estrada B., Chiantore M. (2026). Aquaculture-Based Ecological Restoration: A Further Step of Regenerative and Restorative Aquaculture. *Aquaculture Research*. **2026**. <https://doi.org/10.1155/are/7884319>.
14. Alasgarov G., Kazimov E. (2026). Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic engineering facilities strengthened with composite materials. *ETM Equipment Technologies Materials*. **26**. <https://doi.org/10.36962/ETM33022026-03>.
15. Shamseldein A., Amr M., Attia F. (2026). Impact of treated wash water from ready mix concrete plants on concrete properties and durability. *Scientific reports*. **16**. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-39590-5>.
16. Liu J., Shi F., Liao L., Li F., Sun M., Guo C., Zhang X., Li S., Xia X., Zhang L., Wu Y. (2026). Failure analysis of concrete by submerged water jet impact. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.70483>.
17. Abd L., Abd S., Sachit D. (2026). Influence of Curing with River and Tap Water on the Performance of Various Concrete Slabs. *International Journal of Civil Engineering*. **13**. 47-56. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V13I2P104>.
18. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Lushnikova N., Rudoi V. (2026). Influence of Processing and Mix Design Factors on the Water Demand and Strength of Concrete with Recycled Concrete Fines. *Materials*. **19**. 237. <https://doi.org/10.3390/ma19020237>.
19. Amarnath V. (2026). Robust Control of Water Distribution Networks Under Drought Stress: A Multi-Agent Curriculum Learning Approach. *Water Resources Management*. **40**. <https://doi.org/10.1007/s11269-026-04592-5>.
20. Wang Y., Yan C., Gu Y., Zhai F., Li P., Liu J., Liu P. (2026). Turbidity shapes the spatial diversity of the high-frequency dynamics of bottom layer dissolved oxygen in shallow coastal oceans. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. **109684**. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109684>.
21. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Ayubov N.A., Fediuk R.S., Levkina E.V. Finite Element Design and Analysis of Sustainable Mono-Reinforced and Hybrid-Reinforced Fibergeopolymers. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;**25(3)**:171-185. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>. EDN: UKVSSN
22. Provis J.L., Bernal S.A. (2014) Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, **44**, 299-327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
23. Yang Z., Zhan, Xiewei Z., Hong Z., Bai L., Ruya D., Zhiqiang K. (2024). Eco-sustainable design of seawater sea-sand slag-based geopolymer mortars incorporating ternary solid waste. *Construction and Building Materials*. **431**. 136512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136512>.
24. Lyu X., Robinson N., Elchalakani M., Johns M., Dong M., Nie S. (2022). Sea sand seawater geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*. **50**. 104141. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104141>.
25. AL-Mowafy A., El-Zoughiby M., Youssf O. (2025). Integrating quarry dust and industrial waste in producing eco-friendly hybrid geopolymer concrete. *Scientific Reports*. **15**. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28913-7>.
26. Tanyildizi H. (2024). Deep learning-based prediction of compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete. *Environmental Science and Pollution Research*. **31**. 41246-41266. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33853-2>.
27. Levkina E.V., Fediuk R.S., Guzenko A.G. [et al.] (2026) Economic Instruments in Ensuring Environmental Safety of the Fisheries Complex. *Ecology and Industry of Russia*. **30 (1)**. 48-55. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2026-1-48-55>.
28. Aperador W., Orozco-Hernández G., Cortés-Zambrano M. (2026). Electrochemical Evaluation of an Alkali Activated Eco-Cellular Geopolymer Concrete for the Mitigation of Reinforcing Steel Corrosion in Chloride Containing Environments. *Corrosion and Materials Degradation*. **7**. <https://doi.org/10.3390/cmd7010015>.

Levkina, E.; Gusev, E; Shishkareva, N.; Lar'kina, E.

Assessment of the impact of hydraulic engineering construction materials on the environmental safety of aquaculture facilities; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 120 Article No 12007. doi: 10.4123/CUBS.120.7



29. Youssf O., Eldin D., Tahwia A. (2025). Eco-Friendly High-Strength Geopolymer Mortar from Construction and Demolition Wastes. *Infrastructures*. **10**. 76. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040076>.
30. Athobaiti T., Tahwia A., Abousnina R., Mortagy M., Youssf O. (2026). Performance Evaluation and Microstructural Analysis of Eco-Friendly Self-Compacting Geopolymer Concrete. *Infrastructures*. **11**. 74. <https://doi.org/10.3390/infrastructures11030074>.