

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 626:627.824

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-55-62>**ПРОГНОЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
НИЗКОНАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**В.Л. Снежко¹, П.Е. Хомячков²^{1,2} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация¹ VL_Snejko@mail.ru; ORCID: 0000-0002-3968-0563² khomyachkov.pavel@list.ru

Аннотация. Цель исследований – разработка вероятностной модели прогноза технического состояния однородных грунтовых плотин IV класса для сооружений, возраст которых превысил 25 лет, эксплуатирующихся без персонала и применения контрольно-измерительной аппаратуры. Материалами исследований стали данные разового экспертного обследования, выполненного в 1991-2020 гг. на более чем 1000 бесхозяйных гидроузлах Московского региона. Использование методов искусственного интеллекта – в частности, машинного обучения, для выборки, включающей в себя 947 плотин, и последующая валидация прогнозной модели на выборке из 160 сооружений подтвердили высокую предсказательную способность полученной модели. Модель имела хорошие статистические оценки качества; точность классификации по ошибкам второго рода составляла 89% по обучающей выборке и 94% по валидационной выборке. В результате исследований выявлена степень влияния возраста плотины, ее высоты и наличия крепления верхового откоса на сохранение ее работоспособного состояния. Модель проста в использовании и не требует специализированного программного обеспечения. Результаты исследований могут быть использованы собственниками сооружений или службами эксплуатации для планирования на перспективу финансовых средств, необходимых для поддержания плотин в работоспособном состоянии.

Ключевые слова: низконапорные гидротехнические сооружения, грунтовая плотина, техническое состояние, вероятностный прогноз, машинное обучение

Для цитирования: Снежко В.Л., Хомячков П.Е. Прогноз технического состояния низконапорных грунтовых плотин с использованием методов машинного обучения. Природообустройство. 2026;Т.19(1):55-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-55-62>

Scientific article

**PREDICTION OF THE TECHNICAL CONDITION OF LOW-PRESSURE
EARTH DAMS USING MACHINE TRAINING METHODS**V.L. Snezhko¹, P.E. Khomyachkov²^{1,2} National Research Moscow State University of Civil Engineering; 129337, Moscow, Yaroslavlshoshe, 26, Russian Federation¹ VL_Snejko@mail.ru; ORCID: 0000-0002-3968-0563² khomyachkov.pavel@list.ru

Abstract. The purpose of the research is to develop a probabilistic model for predicting the technical condition of homogeneous earth dams of Class IV for structures that are more than 25 years old and are operated without personnel or instrumentation. The research is based on data from a one-time expert survey conducted between 1991 and 2020 on more than 1,000 unowned hydroelectric facilities in the Moscow region. The use of artificial intelligence methods, particularly machine training, for a sample of 947 dams, and the subsequent validation of the predictive model on a sample of 160 structures, confirmed the high predictive ability of the resulting model. The model had good statistical quality scores, with a classification

accuracy of 89% for second-class errors on the training sample and 94% on the validation sample. As a result of the research, the degree of influence of the dam's age, its height, and the presence of a top slope reinforcement on the dam's ability to maintain its operational condition has been identified. The model is easy to use and does not require specialized software. The research results can be used by facility owners or maintenance services to plan for the future financial resources necessary to maintain the dams in an operational condition.

Keywords: low-pressure hydraulic structures, earth dam, technical condition, probabilistic forecast, machine training

For citation: Snezhko V.L., Khomyachkov P.E. Prediction of the technical condition of low-pressure earth dams using machine training methods. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(1):55-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-55-62>

Введение. На территории Российской Федерации расположено более 30 тыс. комплексов гидротехнических сооружений, в числе которых 96% составляют гидротехнические сооружения (ГТС) IV класса, или класса низкой опасности. Согласно СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» грунтовые плотны будут относиться к IV классу, если основанием служат песчаные, крупнообломочные или глинистые грунты и максимальная высота сооружения по гребню составляет не более 15 м; если водохранилище, создаваемое плотиной, имеет мелиоративное назначение, то его емкость не должна превышать 0,05 км³. Вероятность возникновения аварии на сооружениях IV класса не превышает 5×10^{-3} . Установка автоматизированной системы диагностического контроля на таких плотинах не регламентирована, но должны соблюдаться требования постоянного и периодического контроля технического состояния сооружений и назначаться соответствующий персонал.

Техническое состояние грунтовой плотины контролируется двумя типами показателей: количественными (измеряемыми с помощью технических средств или получаемыми расчетным путем) и качественными, определяемыми на основании визуального осмотра. Согласно СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» основными нарушениями в плотинах из грунтовых материалов являются вертикальные, продольные и поперечные трещины, смещения и деформации нижней части откосов, воронки и просадки на гребне, разрушения бетонного крепления откосов или швов между плитами и т.п. Большинство указанных повреждений может быть обнаружено в результате визуальных наблюдений.

В 2024 г. приказ № 151 Ростехнадзора утвердил федеральные нормы и правила в области безопасности гидротехнических сооружений, согласно которым для ГТС IV класса допускается не проводить инструментальный

контроль, но владелец должен иметь планы технического обслуживания и ремонта сооружений, утверждаемые ежегодно. Приказом Ростехнадзора от 21 февраля 2024 г. № 62 также утверждены формы акта преддекларационного обследования гидротехнического сооружения, в которой необходимо указать основные сведения, характеризующие уровень безопасности ГТС. Согласно требованиям Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ (ред. от 8 августа 2024 г.) «О безопасности гидротехнических сооружений» декларация безопасности необходима для ГТС IV класса при консервации и ликвидации сооружения.

Большинство малых гидроузлов (ГТС IV класса) было введено в эксплуатацию в советский период, а именно после Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 16 июня 1966 г. «О широком развитии мелиорации земель для получения высоких и устойчивых урожаев зерновых и других сельскохозяйственных культур». Созданная в то время сеть проектных институтов и специализированных строительных управлений позволила возводить гидроузлы водохозяйственного назначения промышленными темпами вплоть до 1990 г. Водоохранилища, как правило, создавали грунтовые плотины из местных строительных материалов, построенные с использованием типовых проектов (например, Типовой проект 820-4-023.86 «Плотины земляные насыпные высотой до 12 м с уположенным верховым откосом», Типовой проект 820-04-28.87 «Плотины земляные насыпные высотой до 15 м с крепленным верховым откосом»). Типовые проекты не только определяли конструктивные особенности сооружений, но и содержали указания по производству работ и основные положения по технической эксплуатации плотин. Низконапорные гидроузлы водохозяйственного назначения возводились на малых реках или ручьях, собственниками сооружений были в основном сельскохозяйственные предприятия. Экономические кризисы на рубеже XX-XXI вв. и последовавшие за ними банкротства и смена собственников

малых ГТС привели к тому, что значительная часть сооружений оказалась бесхозной, а новые собственники не имели финансовой возможности содержать квалифицированные службы эксплуатации и обеспечивать должное техническое обслуживание сооружений для обеспечения их безопасности [1].

Проблемы, вызванные старением плотин, построенных в середине прошлого века, характерны для многих стран. Так, во Вьетнаме существует ряд проблем, связанных с обеспечением безопасности малых плотин, используемых для сельскохозяйственных нужд [2]. В Южной Корее более 2/3 гидроузлов, созданных в целях орошения порядка 50 лет назад, в настоящее время являются проблемными в связи с техническим состоянием и соблюдением условий эксплуатации [3]. В США, по данным Американского общества инженеров-строителей, в 2008 г. насчитывалось более 4 тыс. плотин с повреждениями той или иной степени [4], а по данным 2019 г., более чем 1,5 тыс. плотин имели неудовлетворительное техническое состояние [5]. В исследовании [6] отмечено, что небольшие грунтовые плотины в Австралии, находящиеся в собственности фермеров, как правило, не обследуются вовремя по причине высоких затрат, связанных с консультацией квалифицированных инженеров, и это приводит к снижению безопасности таких сооружений.

В настоящее время существует несколько направлений прогноза безопасности плотин. В ряде работ рассматриваются вероятность или риск повреждения сооружений, влекущие за собой прорыв напорного фронта либо перелив воды из водохранилища через гребень плотины, часто используются дерево принятия решений и дерево отказов [7, 8]. В исследовании [9] прогнозируется уровень безопасности каменно-земляной плотины на основании оценок, определенных экспертами, и использования байесовского подхода. С использованием методов теории надежности в работе [10] определен параметр интенсивности отказов для крепления откосов грунтовых плотин, позволяющий выполнить прогноз. Совместное применение методов теории надежности и марковских случайных процессов позволило разработать модель для прогноза снижения уровня безопасности малых грунтовых плотин, в которой также использовался параметр интенсивности отказов [11].

Логистическая регрессия является одним из методов бинарной классификации (наряду с деревьями решений, дискриминантным анализом и байесовскими классификаторами), используемой для прогнозов в геологии и гидротехнике.

Преимуществом этого метода является возможность включения в модель нескольких факторов, влияющих на поведение объекта. В работе [12] составлена прогностическая модель вероятности возникновения оползней, в которой использованы бинарная переменная (оползень возник/оползень не возник) и несколько независимых предикторов (угол склона, литология и т.п.). В исследовании [13] для малых грунтовых плотин был выполнен прогноз дефектов в зависимости от возраста и ширины по гребню.

Разработка моделей прогноза технического состояния малых грунтовых плотин является актуальной задачей для обеспечения их безопасной эксплуатации. Модели должны быть простыми в применении, не требовать специального программного обеспечения и высокой квалификации персонала. Их использование позволит собственникам сооружений (фермерам, малым сельхозпредприятиям, муниципалитетам) планировать на перспективу финансовые средства, необходимые для поддержания плотин в работоспособном состоянии либо для предотвращения снижения безопасности сооружений со временем.

Цель исследований: разработка вероятностной модели прогноза технического состояния однородных грунтовых плотин IV класса для сооружений, возраст которых превысил 25 лет, эксплуатирующихся без персонала и применения контрольно-измерительной аппаратуры.

Материалы и методы исследований. Материалами исследований стали данные разового экспертного обследования низконапорных гидроузлов, расположенных в Московском регионе и обследованных в период с 1991 по 2020 гг. Из базы данных, содержащей сведения более чем о 2 тыс. гидроузлов, были извлечены сведения о техническом состоянии и об уровне безопасности 1107 однородных грунтовых плотин IV класса, которые на момент обследования являлись бесхозными, имели высоту от 2 до 12 м и возраст от 25 до 50 лет. Отбор плотин по высоте производился в соответствии с их градацией в типовых проектах. Капитальный ремонт не был выполнен ни на одном сооружении.

Согласно действующим федеральным нормам и правилам в области безопасности гидротехнических сооружений техническое состояние плотин может быть работоспособным, частично работоспособным и неработоспособным, что определяется сравнением диагностических показателей с их критериальными значениями K_1 и K_2 . В работе [14] для грунтовой плотины в качестве количественных показателей безопасности использованы ширина плотины по гребню и его

отметка, максимальная высота плотины, длина напорного фронта, заложение откосов. Согласно нормативным документам для ГТС IV класса допускается устанавливать один уровень критерильных значений К1. В случае, когда проектная документация утеряна, сведения могут быть получены только в результате экспертного обследования сооружений.

В представленных исследованиях для разработки модели прогноза технического состояния плотин было рассмотрено два состояния: работоспособное и отличающееся от работоспособного (при котором уровень безопасности соответствует неудовлетворительному или опасному уровням). Очевидно, что для обеспечения безопасности плотин необходимо, чтобы сооружение находилось в работоспособном состоянии.

Гистограмма распределения обследованных плотин по возрасту и техническому состоянию на момент экспертного обследования представлена на рисунке.

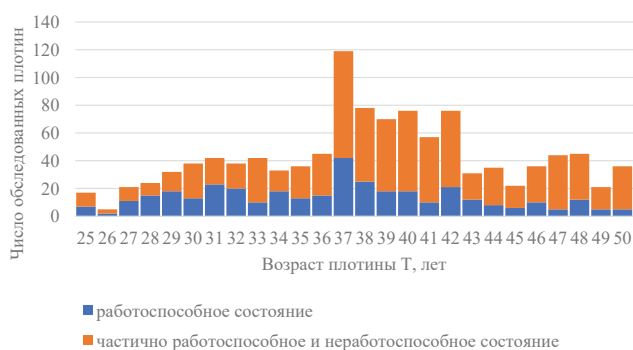


Рис. Гистограмма распределения обследованных плотин по возрасту и техническому состоянию

Fig. 1. Histogram of the distribution of surveyed dams by age and technical condition

Из всех обследованных плотин работоспособное состояние имели 362 сооружения, что составляло 33% от их общего числа. С увеличением возраста плотин доля плотин, имеющих работоспособное состояние, снижалась.

Исходные данные были подразделены на две выборки. Первая выборка являлась обучающей и включала в себя 947 плотин, обследованных в период 1991-2018 гг. Вторая выборка являлась валидационной и включала в себя 160 плотин, обследованных в 2020 г. Плотины в обучающей выборке были введены в эксплуатацию в период с 1960 по 1993 гг., в валидационной выборке – с 1970 по 1995 гг. Элементы в обучающей и валидационной выборках не пересекались. Статистические характеристики обучающей и валидационной выборок и сведения о сооружениях приведены в таблице 1.

Основные статистические характеристики обучающей и валидационной выборок были близки. Наиболее часто встречались плотины высотой 3 м, стандартные отклонения возраста и высоты плотины отличались незначительно. В валидационной выборке средний возраст плотин был несколько выше, а доля плотин, находящихся в работоспособном состоянии, – ниже. Плотины, имеющие крепление верхового откоса, чаще сохраняли работоспособное состояние с течением времени, чем плотины без крепления. Например, в обучающей выборке работоспособное состояние имели 70% плотин с креплением верхового откоса и порядка 30% плотин без крепления.

В качестве модели для прогноза работоспособного состояния однородной грунтовой плотины IV класса была выбрана модель бинарной

Таблица 1. Статистические характеристики выборок

Table 1. Statistical characteristics of samples

Характеристика <i>Characteristics</i>	Обучающая выборка <i>Training sample</i>		Валидационная выборка <i>Validation sample</i>	
	Н, м <i>H, m</i>	Т, лет <i>T, years</i>	Н, м <i>H, m</i>	Т, лет <i>T, years</i>
Среднее / <i>Average</i>	5,10	38	4,70	42
Медиана / <i>Median</i>	4,5	38	4,2	41
Мода	3	37	3	40
Стандартное отклонение / <i>Standard deviation</i>	2,34	6,10	2,24	5,39
Минимум / <i>Minimum</i>	2	25	2	25
Максимум / <i>Maximum</i>	12	50	12	50
Число плотин / <i>Number of dams</i>	947	947	160	160
Доля плотин в работоспособном состоянии <i>Proportion of dams in working condition</i>	35%		22%	
Доля плотин с креплением верхового откоса <i>The proportion of dams with upstream slope reinforcement</i>	9%		6%	

классификации, использующая логистическую функцию вида:

$$p_i = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_1 \cdot T_i + \beta_2 \cdot H_i + \beta_3 \cdot KREP_i)}}, \quad (1)$$

где p_i – вероятность нахождения i -той плотины в работоспособном состоянии; T_i – возраст плотины, лет; H_i – максимальная высота плотины по гребню, м; $KREP_i$ – бинарная переменная, при наличии крепления верхового откоса равная 1, в противном случае – равная 0.

Для определения коэффициентов β_i , входящих в уравнение (1), использовался один из методов искусственного интеллекта – машинное обучение, а именно машинное обучение с учителем. По обучающей выборке методом максимального правдоподобия определялись значения коэффициентов при каждом из факторов: возраст плотины, максимальная высота плотины по гребню, наличие крепления верхового откоса.

На первом этапе выполнялась проверка мультиколлинеарности факторов методами VIF (инфляционных факторов) и VKW (Белли-Ку-Велша). Для учета гетероскедастичности остатков использовались робастные стандартные ошибки (QML), или модифицированные оценки стандартных ошибок. Статистическая значимость коэффициентов оценивалась на 1%-ном и 5%-ном уровнях значимости, определялись доверительные интервалы для коэффициентов.

На втором этапе определялась предсказательная способность модели для обучающей выборки. Порог отсека при преобразовании вероятностей в бинарные классы (работоспособное состояние/состояние, отличающееся от работоспособного) был принят как стандартный и равный 0,5.

Валидация модели выполнялась на заключительном этапе исследований с использованием данных соответствующей выборки. Анализировалась матрица ошибок первого и второго родов при сравнении прогноза с результатами фактического обследования плотин, выполненного в 2020 г.

Все расчеты выполнены в специализированном программном комплексе GRETl.

Результаты и их обсуждение. В результате машинного обучения получена модель, предсказывающая техническое состояние однородной грунтовой плотины IV класса в случае эксплуатации без персонала и контрольно-измерительной аппаратуры:

$$p_i = \frac{1}{1 + e^{-(0,054 \cdot T_i + 0,242 \cdot H_i + 1,157 \cdot KREP_i)}}. \quad (2)$$

Все коэффициенты, включенные в модель (2), значимы на 1%-ном уровне, следовательно, выбранные для прогноза факторы оказывали

влияние на изменения технического состояния плотины со временем. Поскольку анализ не выявил мультиколлинеарности факторов, была выполнена дальнейшая интерпретация коэффициентов. Знаки у коэффициентов не противоречили физической сущности процесса: вероятность сохранения работоспособного состояния с течением времени снижается, в то время как остальные факторы способствуют ее сохранению. Знаки у коэффициентов, полученных в модели (2), совпадают с данными исследований, приведенных в работе [15]. Значения коэффициентов имеют тот же порядок, но не могут быть сопоставлены вследствие различий в спецификации модели бинарного логита, используемой в данных исследованиях.

Для переменной T доверительный интервал, вычисленный для вероятности 95%, лежал в пределах от $-0,063$ до $-0,045$. С увеличением возраста плотины без соответствующих ремонтных мероприятий техническое состояние сооружения ухудшается, и это известный факт, подтвержденный достаточно большим количеством исследований в теории надежности. Угловым коэффициент (или предельный эффект) для переменной «Возраст» составил $-0,012$, следовательно, с увеличением возраста сооружения на 1 год вероятность работоспособного состояния снижается на 1.2%.

Для переменной H доверительный интервал, вычисленный для вероятности 95%, лежал в пределах от 0,183 до 0,301. Чем выше плотина, тем дольше она может сохранять работоспособное состояние, так как требования к качеству производства работ и техническим решениям для высоких сооружений изначально являются более жесткими. Угловым коэффициент для переменной «Максимальная высота плотины» составил 0,054. С увеличением высоты плотины на 1 м вероятность работоспособного состояния возрастает на 5,4%.

Доверительный интервал, вычисленный для вероятности 95%, для переменной $KREP$ лежал в пределах от 0,657 до 1,656. Крепление верхового откоса препятствует размыву грунта тела плотины.

Оценки качества модели прогноза (2) определялись согласно методике, принятой для бинарных классификаторов [16, 17]. Метрики качества модели, полученной по обучающей выборке, приведены в таблице 2.

Количество плотин, техническое состояние которых было классифицировано правильно, приведено на главной диагонали матрицы. Точность модели (*Accuracy*), или общее

число правильных классификаций, составляла 85%. Ошибка первого рода фиксировалась для 66 объектов, ошибка второго рода – для 75 объектов. На практике наиболее опасны классификации, когда фактически плотина имеет частично работоспособное или неработоспособное состояние, а по прогнозу плотина является работоспособной (ошибки первого рода) и своевременные меры по улучшению технического состояния сооружения приняты не будут. В этом случае для обучающей выборки была вычислена точность классификации (*Precision*), которая составила 89%.

Для валидации модели (2) параметры 160 плотин, включенных в валидационную выборку, были подставлены в соответствующее уравнение и выполнен прогноз, который сопоставлен с фактическим состоянием сооружений, определенном в результате экспертного обследования. Метрики качества модели, полученной по валидационной выборке, приведены в таблице 3.

Валидация модели выявила 86% правильных классификаций, то есть для 137 плотин рассматриваемые градации технического уровня были определены верно. Ошибки второго рода или прогноз частично работоспособного/неработоспособного состояния для плотин, фактически имеющих работоспособное состояние, в валидационной модели встречались чаще. В данном случае это не является критичным. Для ошибок первого рода точность модели составила 94%, то есть из 135 плотин частично работоспособного или неработоспособного состояния модель сделала правильный прогноз для 117 сооружений.

Для однородной грунтовой плотины IV класса с возрастом от 25 до 50 лет, находящейся в работоспособном состоянии, прогноз сохранения работоспособного состояния в будущем при отсутствии ремонта и эксплуатационных мероприятий осуществляется достаточно просто. В модель (2) необходимо подставить максимальную высоту плотины по гребню (в метрах), возраст плотины на интересующий момент (в годах), значение 1 или 0 при наличии или отсутствии крепления верхового откоса. Полученное значение вероятности нужно округлить до целого числа. Если результатом округления будет 1, то плотина может сохранить работоспособное состояние через заданное время. Если результатом округления будет 0, то плотина не будет иметь работоспособное состояние и необходимо планировать ремонтные мероприятия до указанного в прогнозе срока. Например, для плотины с креплением верхового откоса возрастом 26 лет,

Таблица 2. Матрица ошибок обучающей выборки (947 плотин)

Table 2. Error matrix of the training sample (947 dams)

Наблюдаемые <i>Observed</i>	Предсказанные / <i>Predicted</i>	
	0	1
0	554	66
1	75	252

Таблица 3. Матрица ошибок валидационной выборки (160 плотин)

Table 3. Error matrix of the validation sample (160 dams)

Наблюдаемые <i>Observed</i>	Предсказанные / <i>Predicted</i>	
	0	1
0	117	8
1	15	20

высотой 2.5 м было выполнено экспертное обследование, в результате которого техническое состояние сооружения признано работоспособным. В течение ближайших 5 лет (условно) финансовая возможность проводить эксплуатационные мероприятия отсутствует. Возраст плотины на момент прогноза составит 31 год. Согласно прогнозу по модели (2) после округления получено значение 1, следовательно, плотина сохранит работоспособное состояние. Если горизонт прогноза увеличить до 10 лет (возраст сооружения – 36 лет), то по модели после округления будет получено значение 0, то есть плотина не сохранит работоспособное состояние и необходимо финансировать соответствующие меры по его поддержанию.

Выводы

С использованием методов машинного обучения впервые получена трехфакторная модель, позволяющая выполнить прогноз работоспособного состояния однородных грунтовых плотин IV класса, расположенных на территории Московского региона, имеющих возраст свыше 25 лет, эксплуатирующихся без персонала и контрольно-измерительной аппаратуры. В качестве предикторов использованы возраст плотины, ее высота и наличие либо отсутствие крепления верхового откоса. Для применения модели высота плотины должна находиться в интервале от 2 до 12 м, возраст сооружения на дату прогноза не должен превышать 50 лет (нормативный срок эксплуатации).

Модель имела хорошие статистические оценки качества; точность классификации

по ошибкам второго рода составляла 89% по обучающей выборке и 94% по валидационной выборке.

В результате исследований выявлена степень влияния возраста плотины, ее высоты и наличия крепления верхового откоса на сохранение ее работоспособного состояния. Чем выше высота плотины, тем дольше она способна сохранять работоспособное состояние. При прочих равных условиях плотины с креплением верхового откоса также сохраняют работоспособное состояние в течение большего времени, чем плотины без крепления.

Модель проста в использовании и не требует специализированного программного обеспече-

ния. При наличии исходных данных выполнение прогноза займет несколько минут.

Результаты исследований могут быть использованы собственниками сооружений или службами эксплуатации для планирования на перспективу финансовых средств, необходимых для поддержания плотин в работоспособном состоянии.

Наличие большого объема данных по техническому состоянию малых грунтовых плотин позволяет в перспективе разрабатывать модели прогноза с использованием другого сочетания предикторов и варьирования методов получения прогноза (дискриминантный анализ, нейронные сети).

Список использованных источников

1. Козлов Д.В. Безопасность и эксплуатационная работоспособность грунтовых плотин на водных объектах Московского региона // Гидротехника. 2021. № 1. С. 56-59. EDN: HHGKET
2. Dam T.T., Pisaniello J., Burritt R. Small dams: A big cause for concern in Vietnam // International Water Power and Dam Construction. 2011. Vol. 63. Pp. 18-22.
3. Jun S.M., Kang M.S., Song I., Hwan S.H., Kim K., Park J. Effects of agricultural reservoir rehabilitation on their flood control capacities // J. Korean Soc. Agric. Eng. 2013. Vol. 55. Pp. 57-68.
4. Kondolf M., Yi J. Dam Renovation to Prolong Reservoir Life and Mitigate Dam Impacts // Water. 2022. Vol. 14. 1464. <https://doi.org/10.3390/w14091464>
5. Amini A., Abdollahi A., Hariri-Ardebili M.A., Lall U. Copula-based reliability and sensitivity analysis of aging dams: Adaptive Kriging and polynomial chaos Kriging methods // Applied Soft Computing. 2021. Vol. 109. 107524. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107524>
6. Pisaniello J., McKay J. (2003). A Farmer-Friendly Dam Safety Evaluation Procedure As A Key Part of Modern Australian Water Laws // Water International. 2003. Vol. 28. Pp. 90-102. <https://doi.org/10.1080/02508060308691668>
7. Белов П.Г. Априорная оценка и снижение риска аварии гидротехнического сооружения на основе моделирования // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 2. С. 26-34. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-2-26-34>
8. Едаменко А.С., Лежанко В.А. Диагностика опасностей гидротехнических сооружений на примере Белгородского // Технологии техносферной безопасности. 2020. № 2 (88). С. 63-73. <https://doi.org/10.25257/TTS.2020.2.88.63-73>
9. Fan Z., Jiang S., Zhang M. Dynamic probability evaluation of safety levels of earth-rockfill dams using Bayesian approach // Water Science and Engineering. 2009. Vol. 2, Iss. 2. Pp. 61-70. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.02.007>
10. Абдразаков Ф.К., Панкова Т.А., Щербачев В.А. Факторы, влияющие на эксплуатационное состояние гидротехнических сооружений // Аграрный научный журнал. 2016. № 10. С. 56-61. EDN: WXBEVX
11. Kozlov D.V., Snezhko V.L., Simonovich O.S. Safety forecast for of low-hazard earth dams beyond their standard service life // Power Technology and Engineering. 2023. T. 56, № 6. С. 795-800.

References

1. Kozlov D.V. Safety and operational performance of earth dams on water bodies of the Moscow region // Hydraulic engineering. 2021. No. 1. P. 56-59. EDN: HHGKET
2. Dam T.T., Pisaniello J., Burritt R. Small dams: A big cause for concern in Vietnam // International Water Power and Dam Construction. 2011. Vol. 63. P. 18-22.
3. Jun S.M., Kang M.S., Song I., Hwan S.H., Kim K., Park J. Effects of agricultural reservoir rehabilitation on their flood control capacities // J. Korean Soc. Agric. Eng. 2013. Vol. 55. P. 57-68.
4. Kondolf M., Yi J. Dam Renovation to Prolong Reservoir Life and Mitigate Dam Impacts // Water. 2022. Vol. 14. 1464. <https://doi.org/10.3390/w14091464>
5. Amini A., Abdollahi A., Hariri-Ardebili M.A., Lall U. Copula-based reliability and sensitivity analysis of aging dams: Adaptive Kriging and polynomial chaos Kriging methods // Applied Soft Computing. 2021. Vol. 109. 107524. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107524>
6. Pisaniello J., McKay J. (2003). A Farmer-Friendly Dam Safety Evaluation Procedure As A Key Part of Modern Australian Water Laws // Water International. 2003. Vol. 28. P. 90-102. <https://doi.org/10.1080/02508060308691668>
7. Belov P.G. A priori assessment and reduction of the risk of accident of a hydraulic structure based on modeling // Occupational safety in industry. 2019. No. 2. P. 26-34. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-2-26-34>
8. Edamenko A.S., Lezhanko V.A. Diagnostics of hazards of hydraulic structures using the example of Belgorod // Technologies of technosphere safety. 2020. No. 2 (88). P. 63-73. <https://doi.org/10.25257/TTS.2020.2.88.63-73>
9. Fan Z., Jiang S., Zhang M. Dynamic probability evaluation of safety levels of earth-rockfill dams using Bayesian approach // Water Science and Engineering. 2009. Vol. 2, Issue 2. P. 61-70. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.02.007>
10. Abdrazakov F.K., Pankova T.A., Shcherbakov V.A. Factors influencing the operational condition of hydraulic structures // Agrarian scientific journal. 2016. No. 10. P. 56-61. EDN: WXBEVX
11. Kozlov D.V., Snezhko V.L., Simonovich O.S. Safety forecast for of low-hazard earth dams beyond their standard service life // Power Technology and Engineering. 2023. T. 56, № 6. С. 795-800.
12. Akbar A.Q., Mitani Y., Nakanishi R., Honda H., Taniguchi H., Djamaluddin I. Integrated Statistical Modeling for Regional Landslide Hazard

12. Akbar A.Q., Mitani Y., Nakanishi R., Honda H., Taniguchi H., Djamaluddin I. Integrated Statistical Modeling for Regional Landslide Hazard Mapping in 0-Order Basins // *Water*. 2025. Vol. 17 (17). 2577. <https://doi.org/10.3390/w17172577>

13. Kaboré M.P.J., Lawane A., Yonaba R., Bi-aou A.C., Nadjibou A., Pantet A. Why Do Small Earth Dams Deteriorate: Insights from Physical Investigations in the West African Sahel // *Resources*. 2024. Vol. 13. 71. <https://doi.org/10.3390/resources13060071>

14. Акпасов А.П., Морозов М.И., Греков Д.А., Кадомцева М.Е. и др. Комплексная оценка технического состояния гидроузла на реке Малый Чембар в Пензенской области // *Природобустройство*. 2025. № 3. С. 53-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-53-62>. EDN: DQYDRX

15. Akhilbekov M., Snezhko V. Predicting the safety level of small earth dams using binary choice models // *E3S Web of Conferences*. 2025. Vol. 670. 02002 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202567002002>

16. Masrom S., Abdul Samad N.H., Septiyanti R., Roslan N., Rahman A. Machine learning prediction for academic misconduct prediction: an analysis of binary classification metrics // *Bulletin of electrical engineering and informatics*. 2024. Vol. 13 (1). Pp. 388-395. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i1.5629>

17. Vabalas A., Gowen E., Poliakoff E., Casson A.J. Machine learning algorithm validation with a limited sample size // *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14 (11). e0224365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224365>

Mapping in 0-Order Basins // *Water*. 2025. Vol. 17(17). 2577. <https://doi.org/10.3390/w17172577>

13. Kaboré M.P.J., Lawane A., Yonaba R., Bi-aou A.C., Nadjibou A., Pantet A. Why Do Small Earth Dams Deteriorate: Insights from Physical Investigations in the West African Sahel // *Resources*. 2024. Vol. 13. 71. <https://doi.org/10.3390/resources13060071>

14. Akpasov A.P., Morozov M.I., Grekov D.A., Kadomtseva M.E., Tuktarov R.B. Comprehensive assessment of the technical condition of the hydraulic structure on the Maly Chembar River in the Penza Region // *Prirodoobustrojstvo*. 2025. No. 3. P. 53-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-53-62> EDN: DQYDRX

15. Akhilbekov M., Snezhko V. Predicting the safety level of small earth dams using binary choice models // *E3S Web of Conferences*. 2025. Vol. 670. 02002 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202567002002>

16. Masrom S., Abdul Samad N.H., Septiyanti R., Roslan N., Rahman A. Machine training prediction for academic misconduct prediction: an analysis of binary classification metrics // *Bulletin of electrical engineering and informatics*. 2024. Vol. 13 (1). P. 388-395. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i1.5629>

17. Vabalas A., Gowen E., Poliakoff E., Casson A.J. Machine training algorithm validation with a limited sample size // *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14(11). e0224365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224365>

Сведения об авторах

Вера Леонидовна Снежко, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства: SPIN-код: 9528-8890; AuthorID: 696880; Scopus Author ID: 57209333075; ResearcherID: ABG-5645-2020; <https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>; vl_snejko@mail.ru

Павел Евгеньевич Хомячков, магистрант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; khomyachkov.pavel@list.ru

About the authors

Vera L. Snezhko, D.Ss (Engin), Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; SPIN-code: 9528-8890; AuthorID: 696880; Scopus Author ID: 57209333075; ResearcherID: ABG-5645-2020; <https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>; vl_snejko@mail.ru

Pavel E. Khomyachkov, Master's Degree Student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; khomyachkov.pavel@list.ru

Вклад авторов

П.Е. Хомячков: выполнил формирование и статистическую обработку выборочных данных

В.Л. Снежко: выполнила расчетную часть исследований. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации

Конфликт интересов / Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interest / Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 28.11.2025

Поступила после рецензирования / Received 01.02.2026

Принята к публикации / Accepted 03.02.2026

Contribution of the authors

P.E. Khomyachkov: performed the formation and statistical processing of sample data

V.L. Snezhko: performed the calculated part of the research. All authors have made equal contributions to the preparation of the publication.