

УДК [528.48:627.8]+519.87

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-18-26>

Автоматизированный учет инерционного запаздывания в прогнозных математических моделях для изучения деформационного состояния высотных плотин

В. С. Хорошилов¹✉, Н. Н. Кобелева¹

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: Khoroshilovvs@mail.ru

Аннотация. Перемещение тела плотины при изменении внешних динамических и температурных воздействий, например, таких как гидростатическое давление и температура тела плотины, происходит не сразу, а через некоторый интервал во времени, которое определяется инерционностью сооружения и его основания. В статье представлены этапы выполнения исследования с целью корректного введения поправки в окончательные результаты прогнозирования перемещения плотины в виде транспортного запаздывания. С этой целью представлены этапы построения дополнительной прогнозной модели для введения транспортного запаздывания в окончательные результаты прогнозирования, что позволило повысить точность окончательных результатов. Отмечается, что перемещение плотины по отношению к входным воздействующим факторам имеет эффект запаздывания (от нескольких дней до месяца и более); в силу этого по измеренным значениям температуры, гидростатического давления и радиального перемещения на реальный момент времени можно выполнить краткосрочный прогноз для выбора наиболее безопасного уровня гидростатического давления при допустимом радиальном перемещении плотины (в данных условиях эксплуатации).

Ключевые слова: прогнозирование перемещения плотины, воздействующие факторы, гидростатическое давление и температура тела плотины, транспортное запаздывание

Для цитирования:

Хорошилов В. С., Кобелева Н. Н. Автоматизированный учет инерционного запаздывания в прогнозных математических моделях для изучения деформационного состояния высотных плотин. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 6. С. 18–26. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-18-26>

Automated accounting of inertial delay in predictive mathematical models for analyzing the deformation state of high-rise dams

V. S. Khoroshilov¹✉, N. N. Kobeleva¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: Khoroshilovvs@mail.ru

Abstract. The study develops a predictive mathematical model incorporating inertial delay to enhance the accuracy of dam displacement forecasts under dynamic and thermal loads. The model accounts for the time lag caused by the inertia of the dam structure and foundation, affecting displace-

ment responses to changes in hydrostatic pressure and temperature. Transport delay is introduced into displacement predictions through a newly constructed forecasting approach, improving the alignment between observed and predicted dam movements. Results demonstrate that displacement lags input factors by several days up to over a month. Using measured temperatures, hydrostatic pressure, and radial displacement data, the model enables short-term forecasts of dam behavior. These forecasts inform the selection of safe hydrostatic pressure levels, maintaining radial displacements within acceptable limits during operation. The methodology provides a robust tool for improving dam safety assessments and operational decision-making in civil engineering applications.

Keywords: dam displacement forecast, influencing factors, hydrostatic pressure and dam body temperature, transport delay

For citation:

Khoroshilov V. S., Kobeleva N. N. (2025). Automated accounting of inertial delay in predictive mathematical models for analyzing the deformation state of high-rise dams. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 30, No. 6. pp. 18–26. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-18-26>

Введение

Как правило, реакция плотины гидротехнического сооружения от момента времени приложения воздействующих факторов происходит со значительным отставанием. Так, перемещение тела плотины при изменении внешних динамических и температурных воздействий (например, гидростатического давления и температуры тела плотины) происходит не сразу, а через некоторый интервал во времени, которое определяется инерционностью сооружения и его основания. Влияние инерционного запаздывания на величину и время перемещения обусловлено влиянием ряда факторов, связанных как с физическими, так и со структурными свойствами материалов и конструкции самой плотины, среди которых следует выделить следующие [1–6]:

– значительная масса и конструктивная жесткость плотины приводит к сопротивлению изменениям на внешние нагрузки (например, со стороны гидростатического давления);

– время реакции материала тела плотины (бетон как материал характеризуется вполне определенными временными характеристиками, напрямую связанными со свойствами его деформации, и этот процесс не может быть мгновенным);

– время амортизации тела плотины проявляется в том, что внутренние процессы сжатия и растяжения в бетоне ведут к фазовому

запаздыванию за счет перераспределения напряжений внутри бетонной конструкции в ответ на внешние воздействия;

– быстрое изменение уровня воды в процессе наполнения водохранилища и разгрузки создают дополнительные инерционные эффекты, приводящие к изменению жесткости конструкции и дополнительным смещениям, что ведет к изменению собственных частот колебаний конструкции плотины;

– изменения температуры воды и тела плотины, наличие трещин, высокая фильтрация, коррозия бетона и т. п. также увеличивают время реакции плотины на внешние воздействия и изменение собственных частот колебаний конструкции плотины.

Наиболее продолжительное и сложное инерционное запаздывание наблюдается на водоподпорных сооружениях ГЭС по основной гармонике сезонных колебаний. Величина этого запаздывания изменяется от одного до нескольких месяцев, а иногда достигает половины годичного периода колебаний входных воздействий и перемещений наблюдаемых точек сооружения. Поэтому при построении прогнозной математической модели для описания деформационного процесса поведения плотины во времени необходимо учитывать данное обстоятельство. Так, например, в работе [7] для определения величины запаздывания представлен метод пошагового сдвига соответствующего графика реакции сооружения в виде горизонтального пе-

ремещения тела плотины относительно графика изменения воздействующего фактора (изменения гидростатического давления). При этом для каждого шага данного сдвига необходимо рассчитывать коэффициент корреляции с использованием выражения

$$r(x, y) = \frac{M(x, y)}{m(x)m(y)}, \quad (1)$$

где

$$M(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

– центральный смешанный момент второго порядка; $m(x)$ и $m(y)$ – средние квадратические погрешности величин перемещения и изменения гидростатического давления. Процесс совмещения графиков заканчивается, когда коэффициент корреляции достигает максимального значения: величина найденного сдвига в данный момент и характеризует величину временной задержки сооружения на входное воздействие. Однако подобный подход возможен в лишь в тех случаях, когда величина инерционного запаздывания остается неизменной во времени или меняется мало. Если же она монотонно меняется от этапа к этапу, то целесообразно построение более корректной зависимости этого изменения для его последующего прогнозирования.

В работах [8, 9] учет инерционного запаздывания предлагается выполнять путем использования фазово-частотной характеристики – величины возникающего в системе фазового запаздывания выходной переменной относительно входного воздействия. Например, для рекуррентных уравнений 2-го порядка, описывающих процесс перемещения тела плотины, рассчитывается модуль комплексного коэффициента передачи (АЧХ), по которому в последующем рассчитывается доля перемещения за счет неучтенных факторов на разных стадиях эксплуатации плотины.

Постановка задачи

В работе авторов [10] отмечается, что подробный тщательный анализ построенных

графиков реакции сооружения и изменения воздействующих факторов путем их сопоставления позволяет достаточно корректно характеризовать прогнозный фон (рис. 1) с целью выявления продолжительности инерционного запаздывания и выявления изменений основных воздействующих факторов, которые включаются в дальнейшем в прогнозную модель. Так, например, в работе [11] с использованием графиков (с помощью созданной программы в среде Excel) на примере изменений радиального перемещения плотины и основных воздействующих факторов (гидростатического давления и температуры) Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) продемонстрирован процесс определения фазового сдвига выходной переменной по отношению к вышеназванным входным воздействиям. Тщательный анализ изучаемых графиков свидетельствует, что максимальная граница для инерционного запаздывания лежит в пределах до 3 месяцев.

В тех отдельных случаях, когда на построенных графиках изменение величин входных воздействующих факторов и выходной переменной прослеживается достаточно слабо, то, чтобы выявить длительность инерционного запаздывания, следует выполнить анализ отдельных разовых выбросов, характеризующих изменения основных воздействующих факторов и выходного параметра при исследовании входного и выходного процессов.

Также в работах авторов [10, 11] ранее было показано, что наблюдаемый монотонный характер реакции плотин гидротехнических сооружений на резкие изменения входных воздействующих факторов можно достаточно корректно описать математическими выражениями в виде дифференциальных или рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков. Так, например, уравнения 2-го порядка обеспечивают достаточно эффективное отслеживание изменения величины инерционного запаздывания в пределах до половины основной гармоники.

В практике натурных исследований гидротехнических сооружений не наблюдалось инерционного запаздывания сооружений на входные воздействия больше вышеуказанной величины. В то же время выполненные авторами исследования позволили выявить [10], что прогнозную модель на основе звена 2-го

порядка рекомендуется строить в тех случаях, когда инерционное запаздывание сезонных процессов не превышает трех месяцев. Тем самым было установлено, что порядок инерционного звена для строящейся прогнозной модели определяется как продолжительностью инерционного запаздывания, так и последующей возможностью включения в прогнозную модель дополнительной модели, отражающей транспортное запаздывание.

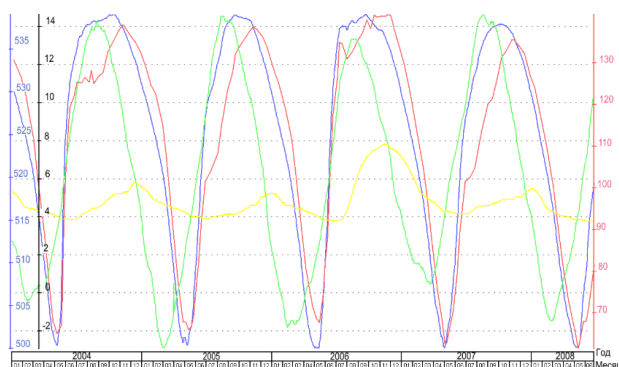


Рис. 1. Изменение радиального перемещения плотины и основных воздействующих факторов: гидростатического давления (УВБ) и температуры бетона плотины в нижней базовой точке $T_{\text{низ}}$:
 --- верхний бьеф (УВБ); --- температура бетона тела плотины; --- радиальные перемещения

Результаты исследований

Проведенные ранее исследования авторов показали, что для изучения деформационных процессов высоких плотин, имеющих большое инерционное запаздывание, наиболее удачными оказались прогнозные модели 3-го типа, 2-го порядка с декорреляцией входных воздействующих факторов [12]. Для описания деформационного поведения плотины СШГЭС были разработаны три разных вида прогнозных математических моделей данного типа. Дискретность результатов измерений составила 3 дня, а взаимные сочетания входных воздействующих факторов представлены в следующем виде:

– U_k (гидростатическое давление) и $T_{\text{низ}}$ (температура бетона тела плотины в нижней базовой точке) выбраны как ре-

зультаты измерений из регулярных натуральных наблюдений;

– U_k и $\Delta T_{\text{расч}}$ (температурный вклад в величину перемещения; вычислена в процессе выполненных расчетов по конечно-элементной модели);

– $\Delta U_{\text{расч}}$ (гидростатический вклад в величину перемещения) и $\Delta T_{\text{расч}}$; вычислены в процессе выполненных расчетов по конечно-элементной модели.

Качество структурной идентификации сконструированных прогнозных моделей в дальнейшем оценивалось по графикам автокорреляционных функций, которые были построены по величинам остаточных ошибок выполненного моделирования (рис. 2); при этом рассматривались все допустимые комбинации входных воздействующих факторов.

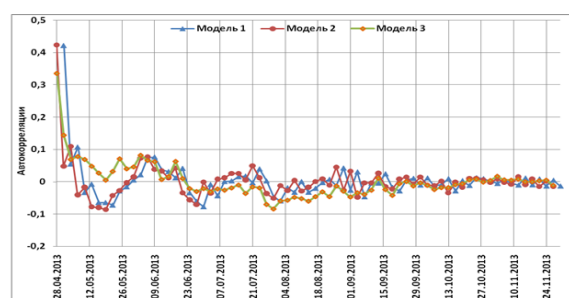


Рис. 2. Вид автокорреляционных функций для трех моделей 3-го типа; декорреляция входных воздействий для различных сочетаний факторов

На представленных графиках явно прослеживается резкое падение корреляционной функции на первоначальном этапе и последующее медленное затухание коэффициентов автокорреляции в виде асимптотического колебания возле нуля без каких-либо ярко выраженных локальных участков. Этот факт служит явным доказательством уменьшения влияния взаимозависимости между основными воздействующими факторами: гидростатическим давлением и температурой.

Для изучения деформационного поведения плотины СШГЭС в процессе дальней-

ших исследований нами была использована построенная прогнозная математическая модель, выраженная в формулах ниже, с помощью которой ранее были продемонстри-

рованы возможности прогнозирования перемещений плотины для периодов эксплуатации 2008–2009, 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 гг. [12]:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,8866U_{k-1} - 0,0581\Delta T_{\text{расч}} + 61,299; \\ x_k &= 0,9142x_{k-1} - 0,0812\Delta T_{\text{расч}} + 8,552; \\ \Delta x_k &= 0,4238\Delta x_{k-1} + 1,3320\Delta U_k - 0,087 + 0,6190\omega_k; \\ \omega_k &= 0,1421\omega_{k-1} + 0,2471\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (2)$$

Следует отметить, что построенная прогнозная модель (2) получилась достаточно корректной для изучения деформационного поведения плотины для всех возможных как штатных, так и нештатных условий эксплуатации (теплый, средний и холодный года), включая при этом и эксплуатацию плотины в условиях аварийной ситуации. Подобное обстоятельство нами интерпретировалось тем, что такой воздействующий фактор, как температура, используемый в виде расчетных значений, полученных на основе конечно-элементной модели, более тщательно отражает перераспределение температуры по всему телу плотины, включая ее более корректное отслеживание в наблюдаемых нижней и верхней базовых точках.

Климатические условия при эксплуатации плотины для каждого года в сильной степени отражают режим ее работы, поэтому наблюдаемые значения изменений основных воздействующих факторов (гидростатического давления и температуры) и выходного параметра (перемещения плотины), принятые на периоде основания прогноза при построении прогнозной модели и на этапе окончательного прогнозирования, существенно различаются между собой. Вследствие данного обстоятельства с целью повышения точности прогнозирования наиболее верные результаты можно получить при использовании такого методического приема, как введение транспортного запаздывания на заключительном этапе в окончательные значения перемещений плотины. Данный методический прием заключается в том, что происходит замена части инерционного запаздывания так называемым транспортным запаздыванием путем подстановки наблюдаемых значений входных факторов и выходной переменной не дата в дату, а со сдвигом по времени на вели-

чину транспортного запаздывания. Данное решение приводит к тому, что появляется возможность не только частично исключить определенную величину инерционного запаздывания, но и корректно учесть и его остаточную составляющую, значения которой могут иметь нечеткие границы.

С целью реализации вышеописанного методического приема была построена дополнительная прогнозная математическая модель, вводящая поправки в виде транспортного запаздывания в окончательные результаты прогнозирования. Для уменьшения взаимного влияния между основными воздействующими факторами применялась модель 3-го типа, 1-го порядка, которая имеет вид [10]

$$\begin{aligned} \Delta U_k &= \varphi_1 \Delta U_{k-1} + \beta_1 \Delta T_k + U_0; \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 \Delta T_k + x_0; \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta U_k; \\ \omega_k &= AP^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины ΔU_k и ΔT_k – входные воздействующие факторы – гидростатическое давление, температура бетона тела плотины, взятые на периоде основания построения прогнозной модели и на этапе окончательного прогнозирования, результатом изменения которых является величина дополнительного перемещения плотины в радиальном направлении; т. е. изменение ΔU_k рассчитывается по изменению температуры по первому уравнению; перемещение x_k также является следствием изменения температуры ΔT_k ; в третьем уравнении представлена рассчитанная величина поправки в виде транспортного запаздывания для перемещения

Δx_k от влияния входных воздействующих факторов – гидростатического давления и температуры бетона тела плотины на периоде основания построения прогнозной модели и на этапе окончательного прогнозирования; четвертое уравнение – запись модели шумовой компоненты.

Процедура построения математической модели представляет поэтапное построение прогнозной модели на основе метода наименьших квадратов [10]:

– на первом этапе по разностям результатов натуральных наблюдений за изменениями температуры $\{\Delta T_k\}$ и соответствующими изменениями гидростатического давления $\{\Delta U_k\}$ на периоде основания построения прогнозной модели и этапе окончательного прогнозирования минимизировался функционал вида

$$F_1(\varphi_1, \beta_1) = \sum_{k=2}^N \left(\Delta U_k - \Delta \hat{U}_{k/k-1} \right)^2;$$

– на втором этапе также для периода построения прогнозной модели и этапа прогнозирования рассчитывались изменения вели-

чины перемещения плотины $\{x_k\}$ от изменения температуры $\{\Delta T_k\}$ путем минимизации функционала вида

$$F_2(\varphi_2, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2;$$

– на третьем этапе вычислялись величины дополнительных перемещений Δx_k между вычисленными по второму уравнению значениями перемещений x_k (как следствие изменения температуры) и соответствующими изменениями величины гидростатического давления ΔU_k путем минимизации функцио-

$$F_3(\varphi_3, \beta_3) = \sum_{k=2}^N \left(\Delta x_k - \Delta \hat{x}_{k/k-1} \right)^2;$$

– на последнем этапе строилась модель шумовой компоненты $AP2$.

Построенная прогнозная модель для автоматизированного учета инерционного запаздывания в процессе окончательного прогнозирования перемещения плотины получила следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta U_k &= 0,7180\Delta U_{k-1} + 0,7754\Delta T_k + 38,147, \\ x_k &= 0,8174x_{k-1} - 0,1217\Delta T_k + 11,523, \\ \Delta x_k &= 0,1732\Delta x_{k-1} + 0,9342\Delta U_k + 0,8453\omega_k, \\ \omega_k &= 0,3790\omega_{k-1} + 0,21530\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \tag{4}$$

На рис. 3 представлены графики измеренных и прогнозных значений перемещений тела плотины, рассчитанных по модели (2) с учетом введения поправки за транспортное запаздывание на этапе эксплуатации плотины 2009–2010 гг.

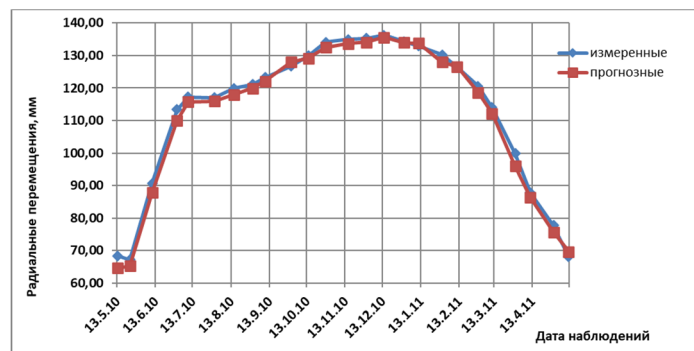


Рис. 3. График измеренных и прогнозных значений перемещений тела плотины по модели (2) после введения поправки за транспортное запаздывание на этапе эксплуатации плотины 2009–2010 гг.

Заключение

1. Изменение гидростатического давления и температуры воды в водохранилище оказывают существенное влияние на инерционное запаздывание тела плотины в результате изменения напряжений, деформаций и динамических ответов конструкции плотины.

2. Дополнительно построенная прогнозная математическая модель для автоматизированного учета инерционного запаздывания перемещения плотины позволила скорректировать величины перемещений путем учета поправки в окончательные результаты прогнозирования в виде транспортного запаздывания, что существенно позволило улучшить точность прогнозных значений перемещений.

3. Прогнозные модели с введенным транспортным запаздыванием являются более корректными для прогнозирования перемещений плотины, так как дают возможность не только частично исключить определенную величину инерционного запаздывания, но и корректно учесть и его остаточную составляющую, значения которой могут иметь нечеткие границы.

4. В силу климатических условий эксплуатации плотины для каждого года наблюдаемые значения изменений основных воздействующих факторов (гидростатического давления и температуры) и выходного параметра (перемещения плотины) существенно различаются между собой, а именно: перемещение плотины по отношению к входным воздействующим факторам имеет эффект запаздывания (от нескольких дней до месяца и более). Данное обстоятельство создает возможность по измеренным значениям температуры, гидростатического давления и радиального перемещения на реальный момент времени выполнить краткосрочный прогноз с целью выбора более безопасного уровня гидростатического давления при допустимом радиальном перемещении плотины (в данных условиях эксплуатации).

Исследования проведены в процессе выполнения государственного задания Минобрнауки России (тема «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера», № FEFS-2023-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров Ю. Н., Юсупов Т. М. О причинах и длительности периода адаптации в системе «плотина – основание» Саяно-Шушенской ГЭС. Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии. Доклады XII научно-технической конференции. 2018. С. 3–12.

2. Вульфович Н. А., Потехин Л. П. Динамика изменения необратимых перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС в период эксплуатации при проектных параметрах нагружения (1990–2016 гг.). Гидротехническое строительство. 2017. № 8. С. 2–8. EDN ZFRQLR.

3. Вульфович Н. А., Гордон Л. А., Стефаненко Н. И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений) : монография. СПб. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2012. 204 с. EDN YLNWTY.

4. Лисейкин А. В., Селезнев В. С., Бах А. А., Кречетов Д. В. Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища. Геофизические методы исследования земной коры. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н. Н. Пузырёва. 2014. С. 182–186. EDN TTVKTV.

5. Hsu T. Y., Valentino A., Liseikin A., Krechetov D., Seleznev V., Chen C. C., Wang R. Z., Lin T. K., Chang K. C. Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects. Measurement Science and Technology. 2020. V. 31. № 1. P. 015801. DOI 10.1088/1361-6501/ab393c. EDN BRIMYU.

6. Savich A. I., Il'in M. M., Elkin V. P., Rechitskii V. I., Basova A. B. Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP. Power Technology and Engineering. 2013. Vol. 47. № 2. Pp. 89–101. DOI 10.1007/s10749-013-0404-7. EDN RFPEWL.

7. Зайцев А. К., Марфенко С. В., Михелев Д. Ш. и др. Геодезические методы исследования деформаций сооружений. М. : Недра, 1991. 272 с.
8. Гуляев Ю. П. Анализ перемещений наблюдаемых точек бетонной плотины с помощью динамических моделей. Геодезия и картография. 1984. № 3. С. 23–25.
9. Гуляев Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений. Новосибирск : СГГА, 2008. 256 с. EDN SAQQCR.
10. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С., Лисицкий Д. В., Кобелева Н. Н. Прогнозирование процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапе эксплуатации 2007–2009 годов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 5 С. С. 23–28. EDN UXVXRP.
11. Хорошилов В. С., Кобелева Н. Н. Математическое моделирование деформационных процессов на объектах гидротехнических сооружений. Новосибирск : СГГА, 2023. 183 с. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58. EDN NSEMDH.
12. Khoroshilov V. S., Kobeleva N. N., Noskov M. F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2022. Vol. 8, No. 2. P. 733–744. DOI 10.22055/JACM.2022.38005.3129. EDN IWWOZV.

REFERENCES

1. Alexandrov, Yu. N., & Yusupov, T. M. (2018). On the causes and duration of the adaptation period in the “dam-foundation” system of the Sayano-Shushenskaya HPP. In *Gidroenergetika. Gidrotekhnika. Novyye razrabotki i tekhnologii: Dvenadtsat' let nauki i tekhnicheskoi konferentsii. Doklady [Hydropower. Hydraulic engineering. New developments and technologies. Report XII scientific and technical conference]* pp. 3–12 [in Russian].
2. Vulfovich N. A., Potekhin L. P. (2017) Dynamics of changes in the irregular movements of the Sayano-Shushenskaya GES plot during operation under design loading parameters (1990–2016) *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*. No. 8. P. 2–8 EDN: ZFROLR [in Russian].
3. Vul'fovich, N. A., Gordon, L. A., & Stefanenko, N. I. (2012). *Arochno-gravitatsionnaya plotina Sayano-Shushenskoy GES (Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya po dannym naturnykh nablyudeniya) [Arch-gravity dam Sayano-Shushenskaya HPP (Assessment of technical condition according to field observations)]*. Saint Petersburg: B. E. Vedenev VNIIG 204 p. ISBN: 978-5-85529-156-8 EDN: YLNWTY [in Russian].
4. Liseikin, A. V., Seleznev, V. S., Bakh, A. A., & Krechetov, D. V. (2014). On the change in the values of natural frequencies of the dam of the Sayano-Shushenskaya HPP at different levels of filling the reservoir. In *Geofizicheskie metody issledovaniia zemnoi kory. Materialy Vserossiiskoi konferentsii, posviashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia akademika N.N. Puzyreva [Processing of the conference “Geophysical methods for studying the Earth’s crust”]* pp. 182–186. EDN: TTBKTV [in Russian].
5. Hsu, T. Y., Valentino, A., Liseikin, A., Krechetov, D., Seleznev, V., Chen, C. C., Wang, R. Z., Lin, T. K., & Chang, K. C. (2020). Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using offsite seismic station data accounting for environmental effects. *Measurement Science and Technology*, 31(1), 015801. DOI: 10.1088/1361-6501/ab393c EDN: BRIMYU.
6. Savich, A. I., Il'in, M. M., Elkin, V. P., Rechitskii, V. I., & Basova A. B. (2013). Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP. *Power Technology and Engineering*, 2(47), 89–101. DOI: 10.1007/s10749-013-0404-7 EDN: RFPEWL.
7. Zaitsev A. K., Marfenko S. V., Mikhelev D. Sh. et al. (1991). *Geodezicheskie metody issledovaniya deformatsiy sooruzheniy [Geodetic methods for studying deformations of structures]* M.: Nedra, 272 p. [in Russian].

8. Gulyaev, Yu. P. (1984). Analysis of displacements of observed points of a concrete dam using dynamic models, *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 3, pp. 23–25 [in Russian].

9. Gulyaev, Yu. P. (2008). *Prognozirovanie deformatsii sooruzheniy na osnove rezul'tatov geodezicheskikh nablyudeniy [Prediction of deformation of the structures on the basis of the results of geodetic observations]*. Novosibirsk: SSGA 256 p. ISBN: 978-5-87693-290-7 EDN: SAQQCR [in Russian].

10. Gulyaev Yu. P., Khoroshilov V. S., Lisitskiy D. V., Kobeleva N. N. (2015) Forecasting the process of transferring the Sayano-Shushenskaya GES plot during the 2007-2009 operation period *Izv. VUZov. Geodeziya i aerofotos"yemka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 5, 23–28 EDN: UXVXRP [in Russian].

11. Khoroshilov V. S., Kobeleva N. N. (2023) *Matematicheskoe modelirovanie deformatsionnykh protsessov na ob"ektakh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Mathematical modeling of deformation processes on hydraulic structures]* Novosibirsk: SSGA 183 p. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58 EDN: NSEMDH [in Russian].

12. Khoroshilov, V. S., Kobeleva, N. N., & Noskov M. F. (2022). Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 8(2), 733–744. DOI: 10.22055/JACM.2022.38005.3129.

Об авторах

Валерий Степанович Хорошилов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космической и физической геодезии.

Наталья Николаевна Кобелева – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Author details

Valery S. Khoroshilov – D. Sc., Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Nadezhda. N. Kobeleva – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Получено / Received 24.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 30.10.2025

Принята к публикации / Accepted 05.11.2025