

Data Processing Technology for the Forecasting of the Water Inflow into a Reservoir with the Use of Earth Remote Sensing and the Network of Meteorological and Hydrological Posts

Eroshenko S.A.¹, Matrenin P.V.^{1,2}, Khalyasmaa A.I.¹,
Klimenko D.E.¹, Sidorova A.V.²

¹Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Management of the hydropower plants requires the economically efficient use of water resources based on the forecasts and simulation models of the hydropower plant and the reservoir. There are various data sources for the water inflow forecasting: meteorological and hydrological posts, Earth remote sensing. However, the problem arises of combining the specified heterogeneous data for aggregated processing with the use of machine learning methods. The research goal is to design an architecture of a system for collecting and processing the data from various sources to operational forecast of the water inflow and the reservoir water-level. It was achieved by analyzing and selecting the sources and methods for the use of Earth remote sensing data; observing the main principles of hydrological modeling; assessing the availability of the different data; analyzing the ways of increasing the observability of the hydrological objects by installing additional meteorological and hydrological posts; and designing a technology for the automatic data collection and processing. The most significant results are developed architecture of the data collection and processing system and the technology for aggregating heterogeneous data with the use of machine learning methods. It is aimed to reduce the error of short-term forecasting of the water inflow to the reservoir. The significance of the results lies in the fact that the proposed technology was offered and justified for a real hydropower plant; and it can improve the water resources management efficiency: increase the energy generation, minimize the sterile spills, increase the flood forecasting horizon and reduce the risk of flooding during the spring high water.

Keywords: architecture of the information system, data collection and processing, Earth remote sensing, hydrological posts, meteorological posts, hydropower plant, inflow forecasting, reservoir.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.4-56.09>

UDC: 621.22+627.81

Tehnologia de prelucrarea datelor pentru prognoza influxului de apă într-un rezervor folosind, teleconecția pământului, rețea meteorologică și stații hidrologice

Eroshenko S.A.¹, Matrenin P.V.^{1,2}, Khalyasmaa A.I.¹
Klimenko D.E.¹, Sidorova A.V.²

¹Universitatea Națională Federală, Ecaterinburg, Federația Rusă

²Universitatea Națională tehnică din Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Gestionarea hidrocentrelor necesită utilizarea eficientă din punct de vedere economic a volumului util al rezervoarelor pentru producerea de energie electrică și respectarea regulilor de utilizare a resurselor de apă. Scopul lucrării este de a proiecta arhitectura unui sistem de colectare și prelucrare a datelor din diverse surse pentru prognoza operațională a debitului către amplasamentul unei centrale hidroelectrice și nivelul lacului de acumulare. Acest obiectiv este atins prin rezolvarea următoarelor sarcini: analiza și selectarea surselor și metodelor de utilizare a datelor de teledetecție Pământului pentru modelarea cartografică digitală și extragerea datelor meteorologice, inclusiv temperatura aerului și suprafeței pământului, intensitatea precipitațiilor, caracteristicile stratului de zăpadă; revizuirea principalelor prevederi ale modelării hidrologice; evaluarea disponibilității acestor date pentru crearea unui sistem de prognoză operațională a afluxului către amplasamentul hidrocentralei; analiza modalităților de creștere a observabilității obiectelor hidrologice prin instalarea unor posturi meteorologice și hidrologice suplimentare; proiectarea unei tehnologii pentru automatizarea colectării datelor și agregarea datelor eterogene pentru prelucrarea lor ulterioară. Cele mai importante rezultate sunt arhitectura dezvoltată a sistemului de colectare și procesare a datelor și tehnologia de agregare a datelor eterogene folosind metode de învățare automată pentru a reduce eroarea în prognoza pe termen scurt a fluxului de apă în amplasamentul stației hidroelectrice. Semnificația rezultatelor constă în faptul că, pe baza analizei tehnologiilor moderne și a analizei aplicabilității acestora la centrala hidroelectrică reală, a fost propusă și justificată o tehnologie care poate îmbunătăți eficiența planificării regimurilor de gestionare a resurselor de apă: creșterea producției de energie electrică, minimizarea deversărilor

în gol, creșterea orizontului de prognoză a inundațiilor și reducerea riscului de inundare a teritoriilor în timpul precipitațiilor de primăvară.

Cuvinte-cheie: arhitectura sistemului informatic, colectarea și prelucrarea datelor, teledetecția Pământului, posturi hidrologice, posturi meteorologice, centrală hidroelectrică, prognoza afluxului, rezervor.

Технология обработки данных для прогнозирования притока воды в водохранилище при использовании дистанционного зондирования земли и сети метеорологических и гидрологических постов

**Ерошенко С.А.¹, Матренин П.В.^{1,2}, Хальясмаа А.И.¹,
Клименко Д.Е.¹, Сидорова А.В.²**

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Управление гидроэлектростанциями требует экономически эффективного использования полезного объема водохранилища для выработки электроэнергии и соблюдения правил использования водных ресурсов, при этом такое управление должно строиться на основе прогнозов и имитационных моделей гидроэлектростанции и водохранилища. Существуют различные источники данных для прогнозирования притока воды: метеорологические посты, гидрологические посты, данные дистанционного зондирования Земли. Однако возникает задача объединения указанных разнородных данных для агрегированной обработки с применением методов машинного обучения. Целью работы является проектирование архитектуры системы сбора и обработки данных от различных источников для оперативного прогнозирования притока к створу гидроэлектростанции и уровня водохранилища. Поставленная цель достигается посредством решения следующих задач: анализ и отбор источников и методов использования данных дистанционного зондирования Земли для цифрового картографического моделирования и извлечения метеорологических данных, включая температуру воздуха и земной поверхности, интенсивность осадков, характеристики снежного покрова; обзор основных положений гидрологического моделирования; оценка доступности указанных данных для создания системы оперативного прогноза притока к створу гидроэлектростанции; анализ способов повышения наблюдаемости гидрологических объектов за счет установки дополнительных метеорологических и гидрологических постов; проектирование технологии автоматизации сбора данных и агрегирования разнородных данных для их последующей обработки. Наиболее существенными результатами являются разработанная архитектура системы сбора и обработки данных и технология агрегирования разнородных данных с применением методов машинного обучения для снижения ошибки краткосрочного прогнозирования притока воды к створу гидроэлектростанции. Значимость результатов заключается в том, что на основании выполненного обзора современных технологий и анализа их применимости к реальной гидроэлектростанции предложена и обоснована технология, способная повысить эффективность планирования режимов управления водными ресурсами: повысить выработку электроэнергии, минимизировать холостые сбросы, увеличить горизонт прогнозирования паводков и снизить риск затопления территорий при весеннем половодье.

Ключевые слова: архитектура информационной системы, сбор и обработка данных, дистанционное зондирование Земли, гидрологические посты, метеорологические посты, гидроэлектростанция, прогнозирование притока, водохранилище.

ВВЕДЕНИЕ

А. Актуальность и методы прогнозирования притока воды в водохранилище

Гидроэлектростанции (ГЭС) занимают существенную долю в общей выработке электроэнергии, при этом относятся к безуглеродной энергетике и могут эффективно использоваться в задачах управления балансом генерации и потребления электроэнергии [1-3].

В то же время планирование режимов работы ГЭС является сложной задачей, требующей учитывать одновременно большое количество гидрометеорологических характеристик водосбора и технико-экономических характеристик гидроузла.

Наиболее важным является прогнозирование притока в водохранилище. Планирование режимов гидрогенерации неразрывно связано с водно-энергетическим расчётом, основанном на прогнозируемом притоке. При этом повысить качество прогнозов притока возможно путем повышения плотности данных наблюдений за гидрометеорологическими и ландшафтными факторами формирования стока, в т.ч. за счет данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), цифровых моделей рельефа, данных экспедиционных и экспериментальных работ за элементами водного баланса водосбора [4-7]. В свою очередь, данные ДЗЗ можно разделить на географические и метеорологические. К географическим относятся

геометрические параметры рельефа и геометрические параметры объектов гидрографии. К метеорологическим относятся атмосферное давление, влажность воздуха, температура воздуха, количественные характеристики твердых и жидких атмосферных осадков.

Задача прогнозирования притока воды в водохранилище ГЭС является сложной не только из-за большого числа факторов, оказывающих на нее влияние, но и из-за их неоднородности и необходимости их получения из разных источников с различной частотой.

Метеорологические и гидрологические данные наземной сети наблюдений собираются в рамках деятельности Росгидромета: данные по гидрологии – каждые 12 часов, по метеорологии – каждые 3 часа. Внедрение в настоящее время автоматических станций и постов позволяет фиксировать данные с минутным разрешением, однако в задачах прогнозирования речного стока такая детальность избыточна. Оптимальным следует считать информацию суточного или 3-часового разрешения по времени.

Данные ДЗЗ о метеорологических параметрах (температура, осадки, площадь снежного покрова) при использовании открытых систем спутниковых данных обновляются с частотой от ежедневной до ежемесячной.

Данные о рельефе и параметрах, связанных с растительностью и почвой обновляются нерегулярно, с периодичностью от 10 лет (для топографических карт) до отдельных месяцев и годов – для космоснимков или аэрофотоснимков отдельных локальных участков кроме того, важно учитывать точность данных, поскольку актуальная цифровая модель рельефа может быть получена с помощью базы данных ESAWorldCover (обновление каждый год), но пространственное разрешение составляет не более 10 метров [8], такие системы, как ЕЭКО и OpenStreetMaps дают пространственное разрешение 5-20 метров [9, 10], SRTM v3 – 30 метров [11].

В задачах гидрологических расчетов достаточным является расширение около 100 м, поскольку более детальное расширение, например, с помощью описанных в работах [11, 12] систем, делает пространственно-распределенные модели громоздкими.

Существующие подходы к прогнозированию притока весеннего половодья или дождевых паводков к водохранилищам можно объединить в физико-математические (детерминированные) и стохастические (типа «черного

ящика») модели. Отдельный класс составляют детерминированно-стохастические модели. Независимо от типа модели они могут иметь сосредоточенные параметры (Стэнфордская модель), полураспределенные (ECOMAG, SWAP) и распределенные в пространстве параметры («Гидрограф», MIKE SHE) [14-16]. Любые из описанных моделей эффективны при соблюдении ряда требований: достаточной географической освещенности «пространства» водосбора исходной гидрометеорологической и ландшафтной информацией; совершенство методов расчета факторов формирования стока, опирающееся почти исключительно на экспериментальные данные (например эксперименты над инфильтрацией, поверхностным задержанием, транспирацией и т.п.); совершенство машинного аппарата сбора и обработки информации.

В то же время развитие моделей машинного обучения, в частности глубоких рекуррентных и глубоких сверточных нейронных сетей привело к появлению работ, в которых исходные данные (временные гидрологические ряды и метеоданные для глубоких рекуррентных моделей или спутниковые снимки для сверточных нейронных сетей) подаются как есть (в исходном виде) в модель для ее обучения и настройки [17-21]. Такие модели принято называть моделями «черного ящика», из чего виден главный недостаток – слабая интерпретируемость результатов. При этом нужно отметить несколько важных факторов, которые ограничивают применение таких моделей.

1. Планирование режимов крупных ГЭС оказывает существенное влияние на экономическую деятельность множества субъектов-пользователей водных ресурсов, а ошибки планирования в период половодий могут привести к паводкам и затоплениям территорий. Таким образом, модели не должны и не могут подменять собой диспетчерское регулирование стока, осуществляемое ГЭС.

2. В случае каскадного регулирования стока группой водохранилищ любые модели должны учитывать фактический график регулирования стока, установленный каждой ГЭС каскада на основании прогноза притока [22]. Иными словами, в случае каскадного регулирования осуществляется уже не моделирование процесса притока как такового, а моделирование схем диспетчерского регулирования стока группой плотин.

3. Валидация моделей на базе машинного обучения (в которых нет дополнительного детерминированного уровня анализа и постобработки), основанного на особенностях предметной области, не гарантируют защиту от редких, но очень больших ошибок. Используемые в научных статьях, посвященных прогнозированию притока, показатели точности, такие как коэффициент детерминации R^2 , оказывается завышен, так как годы с критически высоким или низким уровнем притока усредняются с остальными годами. Эту задачу решают детерминированные модели, опирающиеся на генезис формирования стока, и в этом плане машинное обучение должно быть подкреплено эмпирической информацией.

Данные ДЗЗ возможно использовать как дополнительный источник, повышающий точность прогнозных моделей. В частности, для определения параметров снежного покрова, в статье [23] показано, что данные спутниковой системы Sentinel-1 позволяют прогнозировать уровень снега от 1,5 до 3 метров со средней погрешностью 20–30 %. Также данные ДЗЗ могут быть использованы непосредственно для прогнозирования речного стока путем выявления осадков и снежного покрова из спутниковых снимков, но в этом случае модель оказывается не интерпретируемой и сильно зависящей от качества, скорости и регулярности поступления спутниковых данных [24, 25]. Отдельно следует отметить, что модели машинного обучения, использующие данные ДЗЗ, даже как часть входных данных, могут иметь ограниченное применение для областей с высоким числом дней, когда плотная облачность снижает точность данных, получаемых со спутниковых снимков, или даже делает их неприменимыми.

В. Программное обеспечение для прогнозирования и моделирования гидрологических процессов

Актуальность проведения исследований и разработок в области создания новых систем прогнозирования стока рек, притока воды к створу ГЭС, уровня воды в водохранилище связана также с необходимостью применения специализированного программного обеспечения для выполнения расчетов.

В работе [26] показано, что потребности в алгоритмическом и программном обеспечении в рассматриваемой области будут только расти как минимум до 2030 года, что свиде-

тельствует о стремлении компаний, функционирование которых существенно зависит от речного стока и осадков, к повышению точности и уровня автоматизации планирования.

Опираясь на обзоры, представленные в работах [15, 27, 28], гидрологические модели и соответствующее программное обеспечение можно разделить на несколько групп.

1. Модели речного стока (детерминированные или детерминированно-стохастические) половодий и паводков: TUFLOW, Rainfall Runoff, BMT, MIKE SHE, SHET-RAN, HydroGeoSphere, ParFlow, MGB-IPH, SWAP (Soil Water Atmosphere Plant), LSM (Land Surface Model), CLM (Community Land Model), GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis).

2. Гидродинамические модели, позволяющие моделировать гидравлические особенности потока (скорости, векторное поле), движущегося по водохранилищам и открытым руслам. Можно выделить STREAM 2D CUDA, Delft3D-FLOW, Surface-water Modeling System и RiverFlow2D.

3. Метеорологические модели (модели погоды): интегрированная система прогнозов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ICON), Глобальная система прогнозирования атмосферы военно-морского флота вооруженных сил США; Gloab Forecast System, Viuex.

4. Модели диспетчерского регулирования режима работы водохранилища, такие как SNTTEFF.

Нужно отметить, что проведенный в рамках исследования патентный поиск не выявил наличия патентов, совмещающих в себе работу с гидрологическими, метеорологическими данными и данными ДЗЗ.

В отличие от аналогов, в данном исследовании предлагается использовать систему сбора, передачи и обработки данных разнородных источников, при этом использовать метеорологические данные не только от метеопровайдера, но и от специально проектируемой сети метеорологических постов, охватывающих площадь снеготаяния и уточняющих данные о температуре воздуха, уровне снега и осадках. Аналогично и гидрологические данные необходимо собирать с сети гидропостов, работающих в автономном и автоматизированном режимах. В итоге можно увеличить плотность географически распределенных данных, что приведет к детальному освеще-

нию микроклиматических особенностей водосбора, а зональных факторов стока и прочих физико-географических явлений, не фиксируемых при низкой плотности систем наблюдений.

Таким образом, цель работы – проектирование архитектуры системы сбора и обработки данных от различных источников для оперативного прогнозирования притока к створу гидроэлектростанции и уровня водохранилища – предполагается достичь за счет увеличение плотности сети гидрометеорологических наблюдений и создания гибридного подхода, в котором физико-математическая модель будет дополняться данными ДЗЗ с помощью технологии интеграции детерминированных алгоритмов и методов машинного обучения.

II. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

A. Классификация информации по влиянию на горизонт планирования

Для разработки архитектуры системы сбора, передачи и обработки данных важно определить помимо источников данных, их классификацию по динамике поступления. Выделено три уровня.

1. Оперативные поступающие данные:

1.1) ежедневные сведения о гидрологическом режиме водных объектов: уровень воды; расход воды; ледовая обстановка; приток водохранилища; суммарный приток в водохранилище ГЭС; сбросные расходы воды в нижний бьеф гидроузлов;

1.2) ежедневные метеоданные: температура воздуха; точка росы (влажность); количество осадков; скорость и направление ветра;

1.3) сведения о снежном покрове (ежедневные от сети метеопостов с еженедельным или ежемесячным уточнением по данным ДЗЗ): высота; плотность; запас воды.

1.4) влажность и глубина промерзания почвы.

2. Ретроспективные данные:

2.1) данные многолетних гидрометеорологических наблюдений за параметрами, описанными в п.1.

3. Прогностическая информация:

3.1) метеорологические прогнозы от внешних источников;

3.2) прогнозы действия водохозяйственных субъектов.

B. Основные элементы системы

Разработанная архитектура системы состоит из следующих основных подсистем.

1. Программно-аппаратное обеспечение для сбора данных с автоматической сети гидрологических постов и их передачи на центральный сервер системы (S_{gp}).

2. Программно-аппаратное обеспечение для сбора данных с автоматической сети метеорологических постов, их передачи на центральный сервер (S_{mp}).

3. Подсистема предварительной обработки и размещения данных в базе данных, которая формируется для метеорологических данных, фактических уровней воды в водохранилище, параметров сезонных стоков рек, ретроспективных данных диспетчерских графиков, данных мониторинга текущих запасов снега, данных текущих измерений наземных гидрологических и метеорологических постов (S_{db}). В этой подсистеме закладываются проверки наличия данных, обнаружения ошибок и искажений, применения алгоритмов фильтрации и восстановления отдельных пропущенных значений.

4. Цифровая модель рельефа (S_{dem}). Содержит данные о поверхности рельефа, растительности, геометрических параметров водных объектов. Формируется с помощью средств ДЗЗ, при этом для повышения точности рекомендуется использовать средства аэро съемки с лидаром и эхолотационного исследования дна.

5. Интеллектуальная подсистема обработки спутниковых снимков (S_{rs}). В первую очередь подсистема нужна для оценки параметров снежного покрова с помощью алгоритмов компьютерного зрения.

6. Подсистема повышения точности прогнозов метеорологических параметров, полученных от внешних метеопровайдеров, с использованием модели машинного обучения (S_{mf}). Использование внешних данных и данных собственных постов позволяет повышать точность краткосрочных прогнозов температуры воздуха, осадков и влажности.

7. Детерминированная гидравлическая модель трансформации речного стока в водохранилище для прогноза динамики средних уровней воды, скоростей течений, расходов воды на установленном интервале оперативного

прогнозирования режимов работы гидроузла (S_{gf}).

8. Подсистема оперативного прогнозирования речного стока с использованием модели машинного обучения на основе данных полученного прогноза метеорологических параметров, данных дистанционного зондирования земли, данных мониторинга текущих запасов снега, данных текущих измерений наземных гидрологических и метеорологических постов (S_{rr}).

9. Подсистема вывода полученных результатов с графическим пользовательским интерфейсом (S_i).

При этом подсистемы S_{gp} и S_{mp} логически можно объединить в одну распределенную подсистему сбора и передачи данных S_1 . Подсистемы, выполняющие прием и обработку данных от внешних провайдеров – в систему S_2 .

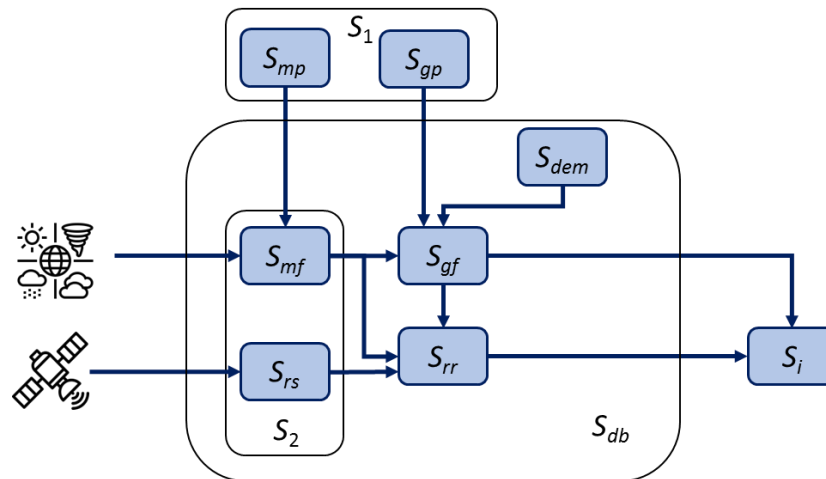
На Рисунке 1 показаны потоки данных в представленной системе. На нем отсутствует в

явном виде подсистема S_{db} , поскольку все потоки данных на самом деле проходят через нее и сохраняются в ней.

Особенности архитектуры системы сбора данных и технологии их обработки

Архитектура и заложенная в ней технология обработки данных имеет ряд особенностей, отличающих ее от аналогов.

1. Предполагается, что для снижения пространственных ошибок интерполяции гидрометеорологической информации и аккумуляирования больших объемов данных компании, управляющей режимами ГЭС, необходимо создать собственную сеть гидрологических постов в бассейне основной реки, питающей водохранилище ГЭС, и сеть метеорологических постов в местах основных снеготпасов, обеспечивающих снеговое питание впадающих в водохранилище рек и ручьев. При этом посты должны работать автономно и автоматически.



S_{gp} , S_{mp} – программно-аппаратное обеспечение сбора и передачи данных сети гидрологических и метеорологических постов, соответственно; S_{db} – подсистема предварительной обработки и размещения данных в базе; S_{dem} – цифровая модель рельефа; S_{rs} – интеллектуальная подсистема обработки спутниковых снимков; S_{mf} – подсистема повышения точности прогнозов метеорологических параметров; S_{gf} – гидравлическая модель трансформации речного стока; S_{rr} – подсистема оперативного прогнозирования речного стока; S_i – подсистема вывода полученных результатов.

Рис.1. Укрупненная архитектура системы сбора и обработки данных:

S_{gp} , S_{mp} – hardware and software for collecting and transmitting data from a network of hydrological and meteorological posts, respectively; S_{db} – subsystem for preliminary processing and placement of data in the database; S_{dem} – digital elevation model; S_{rs} – intelligent subsystem for processing satellite images; S_{mf} – subsystem for improving the accuracy of weather forecast; S_{gf} – hydraulic river runoff transformation model; S_{rr} – subsystem for operational river runoff forecasting; S_i – subsystem for outputting the results obtained.

Fig. 1. Simplified architecture of the data collection and processing system:

2. Постоянный сбор данных с постов системы S_1 позволит применять к данным методы машинного обучения, когда как сейчас основной проблемой их применения в рассматриваемых задачах является недостаточно больших и полных наборов данных.

3. Обработка собственных данных системы S_1 и данных внешних метеопровайдеров позволит применить модели машинного обучения для повышения точности прогнозирования. Одни лишь метеопосты не позволят строить прогнозы с высокой точностью, так как это требует глобальной климатической модели движения атмосферы. В то же время ни один из метеопровайдеров не предоставляет архивы своих прогнозов, что не позволяет оценивать точность прогнозов на длительной ретроспективе. Совмещение же прогнозов внешних провайдеров с реальными данными постов, приведет к формированию данных с ретроспективной информацией, содержащих прогнозы и фактические значения собственных постов. Это позволит, в свою очередь, обеспечить применение моделей машинного обучения для формирования более точных прогнозов метеорологических факторов.

4. Технология обработки данных позволяет применить математический аппарат машинного обучения, не создавая модель вида «черный ящик», поскольку машинное обучение используется для решения только отдельных следующих подзадач:

- уточнение прогнозов метеорологических факторов;
- обработка спутниковых снимков с помощью алгоритмов компьютерного зрения для распознавания геометрии водных объектов и запасов снега в горах;
- уточнение прогнозов стока реки и притока воды к створу ГЭС, полученных с помощью детерминированных физико-математических моделей;
- кластеризация гидрометеорологических условий с помощью алгоритмов обучения без учителя для получения конечного набора условий, для каждого из которых можно адаптировать и настроить собственную детерминированную физико-математическую модель (так, в условиях интенсивного весеннего половодья может быть оставлена только детерминированная часть, чтобы исключить риски ошибок пока модель с машинным обучением не будет успешно верифицирована на данных нескольких половодий).

III. ОСОБЕННОСТИ ГЭС ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

A. Особенности планирования режимов работы реальной ГЭС

Объектом для проведения исследований и для последующей реализации описанной в статье системы является реальная ГЭС в южной части Российской Федерации. Рассматриваемое водохранилище имеет уникальный сложный рельеф, показанный на рис.2 (ГЭС расположена в нижнем левом углу).

Было проведено обследование водохранилища ГЭС, расположенного на крупной реке. Большая погрешность прогнозов приточных расходов весенних половодий и графики сработки водохранилища, приводят к работе с увеличенными расходами воды, пропускаемой через створ ГЭС или к повышенным холостым сбросам.

К разнохарактерным аспектам использования водных ресурсов водохранилищ для данного водохранилища прибавляется тот факт, что основным потребителем его водных ресурсов является ГРЭС (одна из крупнейших тепловых электростанций на Урале), а также необходимость повышенной водоотдачи межженных периодов по межгосударственному соглашению с Казахстаном.

Она забирает воду из водохранилища для целей оборотного водоснабжения. Поэтому поддержанию уровня режима водохранилища будет способствовать повышению эффективности работы насосных станций первого подъема ГРЭС. В то же время, поддержание высокого уровня повышает риск затопления территорий при весеннем половодье.

B. Источники данных для прогнозирования притока к створу реальной ГЭС

В настоящее время насчитывается более 15 действующих гидрологических постов с продолжительностью наблюдений 50-80 лет, также доступны данные многолетних наблюдений на пяти близлежащих метеостанциях.

Анализ ретроспективных данных показал, что особенностью рядов характеристик стока весеннего половодья является статистическая нестационарность рядов в отношении среднего, коэффициента вариации и резко отклоняющихся значений.

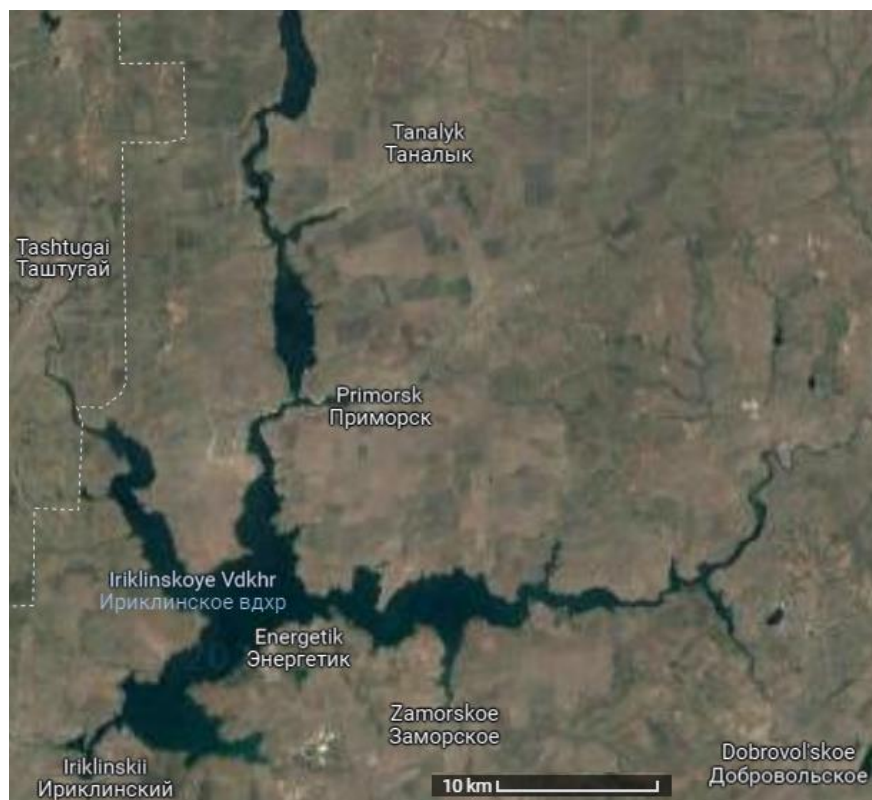


Рис.2. Спутниковый снимок водохранилища с Google Maps.

Fig. 2. satellite image of the reservoir from Google Maps.

Был проведен анализ, показывавший, что вновь открываемые гидрологические посты контролируют сток с 85% общей площади водосбора.

Также запланирована установка трех автоматических метеорологических станций выше по реке.

В качестве данных ДЗЗ предполагается использовать следующие источники:

- данные SRTM для цифровой модели рельефа, абсолютная ошибка которой по высоте для Евразии составляет менее 6 метров в доверительном интервале 90 % [29];
- системы GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) и MODIS (The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) для оценки параметров снежного покрова, их пространственное разрешение составляет 250 и 1000 м.

Предполагается, что для рассмотренной ГЭС предложенная технология позволит повысить точность прогнозирования минимизации холостых сбросов, поддержке требуемого уровня режима водохранилища.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование возможностей и ограничений существующих технологий сбора данных для прогнозирования притока

воды в водохранилище ГЭС. Показано, что перспективным направлением для повышения точности прогнозирования является разработка технологии объединения данных ДЗЗ, прогнозов метеорологических провайдеров и данных автоматизированной сети метеорологических и гидрологических постов, создаваемой специально с учетом географических характеристик бассейна реки, на котором расположено водохранилище ГЭС.

Дано описание принципов, на которых может быть реализована такая технология и укрупненная архитектура системы сбора и обработки данных. Ключевыми особенностями является повышение географической плотности наблюдаемых разными способами гидрометеорологических параметров, применение машинного обучения с минимизацией слабой интерпретируемости моделей вида «черный ящик» и объединением возможностей машинного обучения и детерминированных физико-математических методов.

Проведен анализ применимости предложенной технологии для выбранной ГЭС, определены необходимые источники данных. В ходе дальнейшей работы архитектура системы и технология обработки разнородных данных будет реализована в интеллектуальной аппаратно-программной системе.

ACKNOWLEDGEMENTS

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEUZ-2022-0030 Разработка интеллектуальной мультиагентной системы для моделирования глубоко интегрированных технологических систем в электроэнергетике).

Литература (References)

- [1] International Energy Agency. *Data & Statistics*. 2020. Available at: <https://www.iea.org/> (accessed 11.09.2022).
- [2] Ekanayake P., Wickramasinghe L., Jayasinghe J.M.J.W., Rathnayake U. Regression-Based Prediction of Power Generation at Samanalawewa Hydropower Plant in Sri Lanka Using Machine Learning. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, vol. 2021, id. 4913824, pp. 1-12. doi: 10.1155/2021/4913824
- [3] Berga L. The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review. *Engineering*, 2016, vol. 2, issue 3, pp. 313-318. doi: 10.1016/J.ENG.2016.03.004
- [4] Hawker L., Bates P.; Neal J., Rougier J. Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) Simulation for Flood Modeling in the Absence of a High-Accuracy Open Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science*, 2018, vol. 6, id. 233. doi: 10.3389/feart.2018.00233
- [5] Woldegebrael S.M., Kidanewold B.B., Melesse A.M. Seasonal Flow Forecasting Using Satellite-Driven Precipitation Data for Awash and Om-Gibe Basins, Ethiopia. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 18, id. 4518. doi: 10.3390/rs14184518.
- [6] Coskun H.G., Alganci U., Eris E., et al. Remote Sensing and GIS Innovation with Hydrologic Modelling for Hydroelectric Power Plant (HPP) in Poorly Gauged Basins. *Water Resource Manage.* 2010, vol. 24, pp. 3757-3772. doi: 10.1007/s11269-010-9632-x
- [7] Susilowati Y., Irasari P., Kumoro Y., Nur W.H., Yunarto Y. Micro hydropower plant potential study based on Landsat 8 operational land imager satellite data. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2021, vol. 10, no. 6, pp. 3167-3177, doi: 10.11591/eei.v10i6.3208 p3167
- [8] Worldwide land cover mapping. 2022. Available at: <https://esa-worldcover.org/en> (accessed 06.09.2022).
- [9] Unified electronic cartographic basis [Edinaia elektronnaia kartographiceskaia osnova]. Available at: <https://cgkipd.ru/CECD/> (accessed 08.09.2022) (In Russian).
- [10] OpenStreetMap. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (accessed data 12.09.2022).
- [11] NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 3.0. Available at: <https://lpdaac.usgs.gov/news/nasa-shuttle-radar-topography-mission-srtm-version-30-srtm-plus-product-release/> (accessed 12.09.2022).
- [12] Ghimire S., Yaseen Z.M., Farooque A.A., Deo R.C., Zhang J., Tao X. Streamflow prediction using an integrated methodology based on convolutional neural network and long short-term memory networks. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, id. 17497, pp. 1-26. doi: 10.1038/s41598-021-96751-4.
- [13] Sabirova A., Rassabin M., Fedorenko R., Afanasyev I. Ground Profile Recovery from Aerial 3D LiDAR-Based Maps. *2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2019, pp. 367-374, doi: 10.23919/FRUCT.2019.8711928.
- [14] Montes-Hugo M.A., Bailly J. -S., Baghdadi N., Bouhdaoui A. Modeling the effects of surface and bottom geometries on LiDAR bathymetric waveforms. *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2014, pp. 2706-2708, doi: 10.1109/IGARSS.2014.6947033.
- [15] Motovilov U.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh bassejnov* [Models of Runoff Formation in River Basin Hydrology]. Moscow, 2018. 300 p. (In Russian).
- [16] Neteler M., Bowman M. H., Landa M., Metz M. GRASS GIS: A multi-purpose open-source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 2012, vol. 31, pp. 124-130. doi: 10.1016/J.ENVSOF.2011.11.014.
- [17] Pyankov S.V., Shikhov A.N. *Geoinformacionnoe obespechenie modelirovaniya gidroloicheskikh processov i yavlenij* [Geoinformation support of modeling of hydrological processes and phenomena]. Perm, 2017. 148 p. (In Russian).
- [18] Xu C.-Y., Xiong L., Singh V.P. Black-Box Hydrological Models. *In Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*, Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp. 1-48. doi: 10.1007/978-3-642-40457-3_21-1
- [19] Nair J.P., Vijaya M.S. Predictive Models for River Water Quality using Machine Learning and Big Data Techniques – A Survey. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 2021, pp. 1747-1753. doi: 10.1109/ICAIS50930.2021.9395832
- [20] Sellami E. M., Maanan M., Rhinane H. Performance of Machine Learning Algorithms for Mapping and Forecasting of Flash Flood Susceptibility in Tetouan, Morocco. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2021, vol. XLVI-4/W3-2021, pp. 305-313. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-305-2022
- [21] Minmin H., Jin S. Rapid Flood Mapping and Evaluation with a Supervised Classifier and Change Detection in Shouguang Using Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 Optical Data. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, doi: 10.3390/rs12132073.

- [22] Di Baldassarre G., Viglione A., Carr G., et. al. Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, vol. 17, pp. 3295-3303, doi: /10.5194/hess-17-3295-2013
- [23] Lievens H., Brangers I., Marshall H.-P., Jonas T., Olefs M., De Lannoy G. Sentinel-1 snow depth retrieval at sub-kilometer resolution over the European Alps. *The Cryosphere*. 2022, vol. 16, pp. 159-177. doi: 10.5194/tc-16-159-2022
- [24] Coskun H.G., Alganci U., Eris E., et. al. Remote Sensing and GIS Innovation with Hydrologic Modelling for Hydroelectric Power Plant (HPP) in Poorly Gauged Basins. *Water Resources Management*. 2010, vol. 24, pp. 3757-3772. doi: 10.1007/s11269-010-9632-x
- [25] Zeng T., Wang L., Li X., et. al. A New and Simplified Approach for Estimating the Daily River Discharge of the Tibetan Plateau Using Satellite Precipitation: An Initial Study on the Upper Brahmaputra River. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, id. 2103. doi: 10.3390/rs12132103
- [26] Global Rainfall and Runoff Software Market. 2021. Available at: <https://market.biz/report/global-rainfall-and-runoff-software-market-gm/#details> (accessed 28.09.2022).
- [27] Jehanzaib M., Ajmal M., Achite M., Kim T.-W. Comprehensive Review: Advancements in Rainfall-Runoff Modelling for Flood Mitigation. *Climatology*. 2022, vol. 10, no. 10, id. 147, doi: 10.3390/cli10100147
- [28] Pandi D., Kothandaraman S., Kuppusamy M. Hydrological models: A review. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. 2021, vol. 12, pp. 223-242.
- [29] Farr T.G., Rosen P.A., Edward C., et al. The Shuttle Radar Topography Mission. *Review of Geophysics*. 2007, vol. 45, no. 2, doi: 10.1029/2005RG000183

Сведения об авторах.



Ерошенко Станислав Андреевич, к.т.н., доцент кафедры электротехники УрФУ. Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, распределенная генерация, интеллектуальные системы в электроэнергетике.
E-mail: s.a.eroshenko@urfu.ru



Клименко Дмитрий Евгеньевич, к.г.н., доцент, доцент департамента наук о Земле и космосе УрФУ. Область научных интересов: гидрологические расчеты, дождевые паводки и ливневые осадки, водохозяйственные расчеты.
E-mail: d.e.klimenko@urfu.ru



Матренин Павел Викторович, к.т.н., доцент кафедры электротехники УрФУ и кафедры систем электроснабжения предприятий НГТУ. Область научных интересов: системный анализ, методы машинного обучения.
E-mail: matrenin.2012@corp.nstu.ru



Сидорова Алена Владимировна, аспирант кафедры электрических станций НГТУ. Область научных интересов: оценка технического состояния энергетического оборудования, гидроэнергетика, алгоритмизация режимных ограничений.
E-mail: sidorovaa94@mail.ru



Хальясмаа Александра Ильмаровна, кандидат технических наук., доцент, заведующий лабораторией цифровых двойников в электроэнергетике УрФУ. Область научных интересов: диагностика состояния электрооборудования, методы машинного обучения, системы поддержки принятия решений в электроэнергетике.
E-mail: a.i.khaliyma@urfu.ru