

УДК [626/627:628.1]-048.32:574-048.34
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-4-98-104

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Б.А. Ботоканова, Г.И. Логинов, Урмат уулу Болот, Б.Ж. Жаныбаева

Аннотация. Проведен анализ современных подходов к проектированию и эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС), направленных на снижение их экологического воздействия и адаптацию к изменяющимся климатическим условиям. Особое внимание уделено внедрению экологически ориентированных решений на инновационные конструктивные элементы, а также технологии автоматизации, включая прогнозирующие модели и системы гидродинамической защиты водозаборных сооружений на горных реках. Рассмотрена возможность интеграции возобновляемых источников энергии, включая солнечные и ветровые установки, в состав гидроэнергетических объектов для устойчивого использования ресурсов и сокращения углеродного следа. Рассматривается мировой опыт применения таких решений, подтверждающий их эффективность для восстановления экосистем и улучшения состояния водных объектов. Предложены специальные методы проектирования ГТС для условий Кыргызстана, характеризующегося горным рельефом и активными эрозионными процессами.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения; экологическая оптимизация; устойчивое развитие; регулирование стока воды; водозаборное сооружение; гидроэлектростанция; инновации в строительстве.

ЭКОЛОГИЯЛЫК ОПТИМИЗАЦИЯ ШАРТЫНДА ГИДРАВЛИКАЛЫК КУРУЛУШТАРДЫН ДОЛБООРУН ЖАКШЫРТУУ

Б.А. Ботоканова, Г.И. Логинов, Урмат уулу Болот, Б.Ж. Жаныбаева

Аннотация. Макала гидротехникалык курулуштарды (ГТК) долбоорлоого жана эксплуатациялоого, алардын айлана-чөйрөгө тийгизген таасирин төмөндөтүүгө жана өзгөрүп жаткан климаттык шарттарга ыңгайлашууга багытталган заманбап ыкмаларды талдоого арналган. Өзгөчө көңүл инновациялык структуралык элементтер үчүн экологияга багытталган чечимдерди, ошондой эле автоматташтыруу технологияларын, анын ичинде болжолдоочу моделдерди жана суу алуучу конструкцияларды гидродинамикалык коргоо системаларын ишке ашырууга бурулат. Ресурстарды туруктуу пайдаланууну камсыз кылуу үчүн энергиянын кайра жаралуучу булактарын, анын ичинде күн жана шамалды гидроэнергетикалык объектерге интеграциялоого басым жасалат. Мындай чечимдерди колдонуунун дүйнөлүк тажрыйбасы каралып, алардын экосистемаларды калыбына келтирүү жана суу объектилеринин абалын жакшыртуу үчүн натыйжалуулугун тастыктайт. Кыргызстандын тоолуу рельефи жана активдүү эрозия процесстери менен мүнөздөлгөн шарты үчүн гидротехникалык курулуштарды долбоорлоонун алардын туруктуулугун жана экологиялык шайкештигин жогорулатууга багытталган атайын методдору сунуш кылынган. Изилдөөнүн натыйжалары суу ресурстарын башкаруунун эффективдүү системаларын түзүүгө жана климаттык тобокелдиктерди кыскартууга көмөктөшүүчү экологиялык жана инженердик аспектилери айкалыштырган комплекстүү мамиленин маанилүүлүгүн белгилейт. Берилген корутундулар жана сунуштар гидротехникалык курулуштарды модернизациялоо жана глобалдык экологиялык көйгөйлөрдүн шартында суу ресурстарын башкаруу үчүн колдонулушу мүмкүн.

Түйүндүү сөздөр: гидротехникалык курулуштар; экологиялык оптималдаштыруу; туруктуу өнүгүү; суунун агымын жөнгө салуу; суу алуучу курулма; гидроэлектростанция; курулуштагы инновациялар.

IMPROVEMENT OF HYDRAULIC STRUCTURES DESIGNS IN CONDITIONS OF ECOLOGICAL OPTIMIZATION

B.A. Botokanova, G.I. Loginov, Urmat uulu Bolot, B.Zh. Zhanybaeva

Abstract. The analysis of modern approaches to the design and operation of hydraulic structures (HGT) aimed at reducing their environmental impact and adapting to changing climatic conditions is carried out. Special attention is paid to the implementation of environmentally oriented solutions for innovative structural elements, as well as automation technologies, including predictive models and systems of hydrodynamic protection of intake structures on mountain rivers. The possibility of integrating renewable energy sources, including solar and wind installations, into hydropower facilities for the sustainable use of resources and reduction of the carbon footprint has been considered. The article considers the global experience of using such solutions, confirming their effectiveness for restoring ecosystems and improving the condition of water bodies. Special methods of HGT design are proposed for the conditions of Kyrgyzstan, characterized by mountainous terrain and active erosion processes.

Keywords: hydroengineering; ecological optimization; sustainable development; water flow management; water intake; hydroelectric power plant; construction innovation.

Введение. Гидротехнические сооружения играют ключевую роль в управлении водными ресурсами, обеспечивая водоснабжение, ирригацию, гидроэнергетику и защиту от наводнений. Однако с ростом экологических вызовов, таких как изменение климата и загрязнение водоемов, необходимо адаптировать существующие конструкции к новым условиям. Об этом свидетельствуют примеры из Средней Азии и Европы, демонстрирующие успешные практики и инновационные подходы к экологической оптимизации гидротехнических сооружений.

Материалы и методы исследования. Для выполнения данного исследования был применен аналитический метод, который включает в себя обзор существующих теорий и практик в области гидротехнического строительства, а также анализ текущих решений, направленных на экологическую оптимизацию гидротехнических сооружений (ГТС).

Оценка мирового опыта проектирования ГТС с учетом экологических факторов проводится посредством сопоставления различных методов проектирования и их воздействия на экосистемы. Дополнительно используется сравнительный анализ данных о результативности внедрения экологически ориентированных решений в проектирование и эксплуатацию ГТС.

Объектом исследования являются конструкции гидротехнических сооружений, таких как плотины, водохранилища, водозаборные сооружения (ГВС), каналы, а также их взаимодействие с окружающей средой и влияние на экосистемы водоемов и водотоков. Особое внимание уделяется проектам, направленным на экологическую оптимизацию, включая рыбоходы, методы снижения загрязнения и адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

Новизна исследования заключается в разработке инновационного подхода к проектированию, эксплуатации и модернизации гидротехнических сооружений с учетом экологических требований. Предложенные решения ориентированы на улучшение взаимодействия инженерных и природных систем, повышение надежности ГТС в условиях изменяющегося климата, снижение их воздействия на экосистемы, а также обеспечение устойчивого использования водных ресурсов. Эти результаты могут быть использованы для создания более эффективных, долговечных и экологически безопасных гидротехнических объектов как в Кыргызстане, так и в других странах с аналогичными природно-климатическими условиями.

Основная часть. Рассмотрены примеры из мировых практик. На мировом уровне уже существуют примеры успешной реализации экологически ориентированных проектов ГТС.

Например, в Канаде для восстановления миграции рыбы и других водных животных применяют рыбоходы и экологические шлюзы на крупных гидроэлектростанциях [1, 2].

В Швеции активно внедряются системы автоматического регулирования уровня воды в водохранилищах, что позволяет минимизировать нарушения экосистем. В Нидерландах проектируются дамбы

с элементами зеленой инфраструктуры, что способствует сохранению биоразнообразия и улучшению качества вод [2].

В настоящее время в условиях Кыргызстана водохранилищные узлы, построенные в постсоветский период, сталкиваются с проблемой интенсивного заиления. Накопление донных наносов – мелких частиц грунта, песка, глины и органических веществ, переносимых водными потоками – оказывает значительное негативное воздействие на функционирование водохранилищ и состояние экосистем. Этот процесс приводит к ряду серьезных последствий, затрагивающих как экологические, так и гидро-технические аспекты [3–7]:

- 1) уменьшение полезного объема водохранилищ;
- 2) повышение нагрузки на гидротехнические сооружения из-за заиления водозаборных систем;
- 3) снижение эффективности работы гидроэлектростанций (ГЭС).

С учетом всех перечисленных выше негативных факторов авторами был проведен анализ ситуации в Кыргызстане [8, 9]. Исследованы:

- ключевые водохранилища страны (Токтогульское, Курпсайское и др.);
- особенности заиления в горных и равнинных регионах;
- статистические данные о снижении объемов воды и изменении ее качества.

По результатам исследований был предложен ряд рекомендаций и мероприятий по их осуществлению, в частности:

- проведение регулярного дноуглубления и очистки водохранилищ;
- создание русловых отстойников для задержки наносов;
- восстановление растительности в водосборных бассейнах для снижения эрозии;
- разработка новых методов мониторинга и оценки заиления.

Для эффективной оптимизации управления водохранилищами и минимизации их воздействия на окружающую среду необходимо использовать современные технологии и подходы. Это будет способствовать поддержанию экологического баланса и обеспечению устойчивого использования водных ресурсов [9]. Необходимо использовать:

Системы автоматического регулирования уровня воды. Современные автоматизированные системы оснащены датчиками, которые отслеживают уровень воды, объем осадков, температуру и скорость течения в реальном времени. На основе собранных данных интеллектуальные алгоритмы оперативно регулируют объем воды в водохранилищах, предотвращая переполнение или обмеление. Это позволяет [10]:

- минимизировать риск наводнений в периоды сильных осадков;
- поддерживать оптимальный уровень воды для экосистем и водоснабжения;
- улучшить управления паводковыми режимами рек.

Прогнозирующие модели управления. Использование цифровых моделей на основе искусственного интеллекта и машинного обучения позволяет анализировать гидрологические, климатические и эксплуатационные данные. Эти системы [10]:

- предсказывают изменения уровня воды в зависимости от сезонных факторов и климатических изменений;
- обеспечивают готовность к кризисным ситуациям, таким как наводнения или пересыхание водоемов;
- способствуют улучшению планирования сбросов воды с учетом потребностей экосистем.

Возобновляемые источники энергии и интеграция ГЭС. Водоохранилища активно используются в качестве ключевого компонента гидроэнергетики. Автоматизированные системы управления водными ресурсами позволяют оптимизировать работу гидроэлектростанций, что дает следующие преимущества [10]:

- снижение выбросов парниковых газов за счет повышения доли возобновляемой энергии;
- регулирование водных потоков с учетом сезонных и энергетических потребностей;

- уменьшение негативного антропогенного влияния на природу.

Инновационные методы управления наносами и автоматизации водозаборных сооружений.

Для борьбы с заилением водохранилищ внедряются современные технологии, включая системы контролируемого осаждения твердых частиц и очистки донных отложений. Эти меры:

- предотвращают снижение полезного объема водохранилищ;
- способствуют сохранению качества воды и биологического разнообразия;
- увеличивают долговечность гидротехнических сооружений.

Применение таких методов позволяет оптимизировать эксплуатацию водохранилищ и снижать негативное влияние на экосистемы.

Автоматизация и защита водозаборных сооружений. Современные подходы к управлению водозаборными сооружениями базируются на разработках Г.И. Логинова и его рекомендациях по внедрению технологий автоматизации и гидродинамической защиты от наносов, которые направлены на [11]:

- повышение эффективности и надежности работы сооружений;
- обеспечение экологической безопасности;
- снижение эксплуатационных затрат.

Особую роль играют автоматические системы регулирования, которые адаптируют режим работы к текущим гидрологическим условиям, минимизируя риски разрушительных процессов.

Практика эксплуатации водозаборов в Кыргызстане. Эксплуатация водозаборных сооружений на реках предгорных зон Кыргызстана показала, что усовершенствованные конструкции гидротехнических сооружений (ГСВ) [11]:

- эффективно регулируют русловые процессы и гидравлическую структуру потока;
- играют ключевую роль в проектировании гидроэнергетических и ирригационных систем.

Совершенствование методов исследования и обоснование параметров водозаборов позволило существенно снизить затраты на эксплуатацию низконапорных плотинных сооружений в зимний период.

Современные компоновочные схемы гидроузлов. Для повышения коэффициента водозабора разработаны новые схемы, которые охватывают как строительство новых объектов, так и реконструкцию существующих. В основе этих разработок лежат [10, 11]:

- управление потоками воды;
- эффективная борьба с наносами;
- устранение влияния плавающего мусора;
- предотвращение негативного воздействия ледовых образований.

Применение современных средств автоматизации обеспечивает оптимальное функционирование системы в сложных климатических условиях (рисунок 1).

Преимущества предложенных решений [12–14]:

1. Повышение эксплуатационной надежности водозаборных сооружений.
2. Снижение затрат на техническое обслуживание.
3. Устранение негативного воздействия гидродинамических процессов.

Инновационные подходы к проектированию и модернизации гидроузлов способствуют эффективному использованию водных ресурсов и минимизации экологических рисков, что особенно важно в условиях климатической изменчивости Кыргызстана.

Кроме того, системы автоматического контроля снижают зависимость от ручного труда и повышают эффективность эксплуатации водозаборов, что особенно важно в зимний период, когда низкие температуры могут негативно сказываться на работоспособности оборудования. Автоматизация процессов также минимизирует затраты на техническое обслуживание и способствует более эффективно использованию энергетических ресурсов.

Совершенствование гидравлических процессов в гидротехнических туннелях малых ГЭС имеет большое значение для повышения их эффективности и минимизации воздействия на окружающую

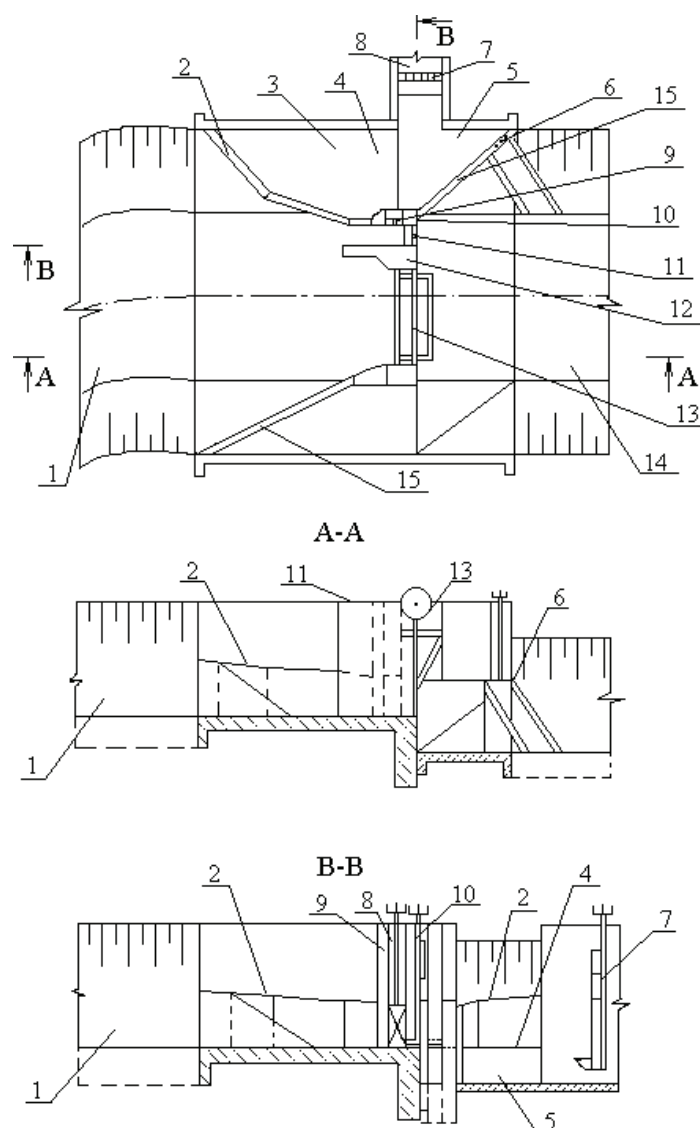


Рисунок 1 – Компонентная схема автоматизированного водозаборного гидроузла с щитовым отверстием для зимнего водоотбора с постоянным промывом наносов и отводом ледовошуговых образований:

1 – зарегулированное подводящее русло; 2 – ломаный в плане наносозащитный порог с переменным уклоном гребня; 3 – водоприемная камера; 4 – верхний ярус водоприемной камеры; 5 – нижний ярус водоприемной камеры; 6 – затвор для опорожнения водоприемной камеры; 7 – стабилизатор расхода; 8 – отводящий канал; 9 – щитовое отверстие для зимнего водоотбора; 10 – разделительная стенка; 11 – затвор промывного тракта с горизонтальным козырьком; 12 – промежуточный устой; 13 – затвор-автомат уровня верхнего бьефа; 14 – отводящее русло; 15 – автоводосливы

среду. Оптимизация структуры потока воды способствует улучшению работы турбин, снижению энергетических потерь и минимизации негативного влияния на экосистемы водоемов. Внедрение современных технологий управления и мониторинга способствует повышению эксплуатационной надежности, снижению затрат на обслуживание и улучшению экологической устойчивости.

В будущем исследования в этой области будут направлены на разработку более эффективных методов управления гидравлическими процессами, внедрение инновационных технологий и обеспечение устойчивости малых ГЭС в условиях изменяющегося климата.

Заключение. В ходе исследования была проведена всесторонняя оценка применения экологически ориентированных решений в управлении водозаборными сооружениями и гидротехническими системами, а также рассмотрены успешные мировые практики в области минимизации воздействия на экосистемы.

В Кыргызстане проблема заилиenia водохранилищ остается довольно актуальной, так как накопление донных наносов негативно влияет на работу гидротехнических сооружений, снижая их функциональность и нарушая экологический баланс. В связи с этим, использование таких методов, как автоматическое регулирование уровня воды, прогнозирующие модели, инновационные подходы к управлению наносами и интеграция возобновляемых источников энергии представляют собой эффективные решения экологических и эксплуатационных проблем, возникающих в связи с заиливанием водохранилищ.

Внедрение современных технологий в гидротехническое строительство, таких как системы автоматизации и защиты от наносов, значительно улучшает эксплуатационную надежность водозаборных сооружений и снижает риски, связанные с гидродинамическими процессами и сезонными изменениями структуры водных потоков.

Важно отметить, что эти инновации не только повышают эффективность работы гидросистем, но и способствуют поддержанию экологического баланса, что особенно актуально в условиях изменения климата и усиления антропогенных воздействий на природные ресурсы.

Выводы. Обоснована необходимость экологической оптимизации гидротехнических объектов с использованием современных методов, направленных на восстановление экосистем и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Эти подходы обеспечивают эффективное взаимодействие между инженерными и природными системами.

Рекомендовано использовать автоматизированные системы регулирования уровня воды и прогнозирующих моделей для управления водозаборными сооружениями, что способствует повышению их надежности, улучшению качества водоснабжения и снижению рисков экстремальных ситуаций, таких как наводнения или засуха.

Предложены меры для эффективного управления процессом заилиenia водохранилищ, включая регулярное дноуглубление, создание осадочных бассейнов и восстановление растительности в водосборных бассейнах. Эти меры не только помогут предотвратить накопление наносов, но и способствуют улучшению качества водных ресурсов и сохранению биоразнообразия.

Интеграция возобновляемых источников энергии в гидроэнергетические объекты позволит снизить выбросы парниковых газов и минимизировать антропогенное воздействие на экосистемы. Это решение будет способствовать устойчивому использованию природных ресурсов и снижению экологического воздействия.

Применение современных технологий и методов, адаптированных к специфическим условиям Кыргызстана – ключевой фактор для повышения эффективности эксплуатации водохранилищ. Такие меры обеспечат долговечность объектов и их устойчивость к изменениям климатических и гидрологических условий.

Таким образом, внедрение экологически ориентированного управления водозаборными сооружениями и применение инновационных подходов в гидротехническом строительстве будет способствовать устойчивому использованию водных ресурсов и сохранению экосистем.

Поступила: 26.02.2025; рецензирована: 12.03.2025; принята: 14.03.2025.

Литература

1. *Ramachandra T.V.* Optimal design of hydroelectric projects in Uttara Kannada, India / T.V. Ramachandra, D.K. Subramanian, N.V. Joshi // *Hydrological sciences Journal – Des sciences Hydrologiques*. 2000. V. 45(2). P. 299–315. URL: <https://wgbis.ces.iisc.ac.in/energy/paper/optimal/OPTIMAL.pdf> (дата обращения: 10.11.2024).
2. *Müller F.* Monitoring Water Quality in Large Dams: A Case Study of the Three Gorges Project / F. Müller, & P. Kruse // *Water Quality Research Journal of Canada*. 2019, 54(2), 129–140. DOI: 10.2166/wqrjc. 2019.003. (дата обращения: 10.11.2024).
3. *Осмонбетова Д.К.* Водохранилища Кыргызстана и их использование для обеспечения гидроэкологической безопасности страны и сопредельных территорий: дис. ... канд. геогр. наук / Д.К. Осмонбетова. М., 2001. 160 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-11/42-5. URL: <http://www.dslib.net/gidrologia/vodohraniliwa-kyrgyzstana-i-ih-ispolzovanie-dlja-obespechenija-gidrojekologicheskoy.html> (дата обращения: 20.11.2024).
4. *Петрова Н.В.* Современные подходы к проектированию гидротехнических сооружений / Н.В. Петрова // *Научные труды университета*. 2019. Т. 12. № 1. С. 75–82.
5. *Григорьев А.И.* Применение современных методов анализа для оптимизации конструкции водохранилищ / А.И. Григорьев, Д.А. Тихонов // *Водные ресурсы России: проблемы и решения*. 2019. Т. 10. № 1. С. 60–68.
6. *Лавров Н.П.* Водозаборное сооружение из горных рек / Н.П. Лавров, А.В. Шипилов, О.В. Атаманова, Г.И. Логинов. Патент на полезную модель RU 133537 U1, 20.10.2013. Заявка № 2013114788/13 от 02.04.2013. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38420530> (дата обращения: 01.12.2024).
7. *Лавров Н.П.* Реализация научно-технических идей академика Я.В. Бочкарева в современных гидротехнических проектах Кыргызстана и Казахстана / Н.П. Лавров, О.В. Атаманова // В сб.: *Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства*. Рязань: Всеросс. научн.-иссл. ин-т сельскохозяйственного использования мелиорированных земель, 2013. С. 3–9.
8. *Атаманова О.В.* Повышение промышленной безопасности сооружений Курпсайского гидроузла и нижнего бьефа плотины при работе поверхностного водосброса / О.В. Атаманова, Н.П. Лавров // *Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛПИТ 2015: сб. трудов Межд. эколог. конгресса (седьмой межд. научно-техн. конф.)*. Самара, 2015. С. 3–9.
9. *Мадумаров А.Э.* Анализ результатов модельных исследований существующей конструкции поверхностного водосброса гидроузла Курпсайской ГЭС / А.Э. Мадумаров, Д.У. Алиев, Н.П. Лавров // В сб.: *Неделя науки СПбПУ. Матер. науч. конф. с межд. участием*. СПб.: Инженерно-строительный ин-т, 2018. С. 22–24.
10. *Логинов Г.И.* Руслловые и гидравлические процессы при водозаборе из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Г.И. Логинов. Бишкек: КРСУ, 2014.
11. *Логинов Г.И.* Гидравлические процессы при водозаборе из малых горных рек / Г.И. Логинов. 2-е изд. перераб. и доп. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2014. 196 с.
12. *Логинов Г.И.* Результаты исследований зимнего режима эксплуатации водозаборных сооружений деривационных гидроэлектростанций / Г.И. Логинов // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2016. № 1. С. 38–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25738288> (дата обращения: 20.12.2024).
13. *Кайыпова Н.У.* Методы исследований гидротехнических сооружений и определение их параметров / Н.У. Кайыпова, Б.А. Ботоканова // *Вестник КРСУ*. 2022. Т. 22. № 12. С. 115–119. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=50199508> (дата обращения: 20.12.2024).
14. *Приоритеты развития малой гидроэнергетики в Кыргызстане* / Б.А. Ботоканова, Усон кызы Э., Э.И. Исматиллаев // *Вестник КРСУ*. 2023. Т. 23. № 8. С. 4–8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54674086> (дата обращения: 20.12.2024).