Научная статья
УДК 627.8.04
doi: 10.55186/25876740_2022_65_6_573

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТИВОПАВОДКОВОЙ СИСТЕМЫ В ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ КОМПЛЕКСЕ НИЖНЕЙ КУБАНИ В УСЛОВИЯХ ВОЗРАСТАЮЩИХ СТАТИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.А. Волосухин, М.А. Бандурин, И.А. Приходько, Я.А. Комсюкова
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина,
Краснодар, Россия

Аннотация. Крупнейшим объектом не только на Кубани, но и на всем Северном Кавказе является Краснодарское водохранилище, которое осуществляет следующие функции: противопаводковые, судоходные, мелиоративные, рыборазведение, питьевые, опреснительные, рекреационные. В настоящее время сложились благоприятные условия для выполнения исследований в области мониторинга технического состояния противопаводковой системы и эффективности систем инженерной защиты от паводков в водохозяйственном комплексе Нижней Кубани. Это обусловлено федеральной и региональной поддержкой научных исследований, которые направленны на предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях. В статье выполнена оценка последствий и величины возможного ущерба от затопления в результате гидродинамической аварии на плотине Краснодарского водохранилища. Проведены расчеты различных аварийных ситуаций на Краснодарском гидроузле, связанных с разрушением напорного фронта. Наихудшим из всех сценариев является сценарий образования прорана в русловой части плотины с отметкой дна прорана 20,0 м и шириной бреши до 800 м. В этом случае максимальный расход через проран составляет 28000 м^3/с, уровни затопления в нижнем бьефе выше железнодорожного моста достигают 27 м, скорости в русле достигают 3-4 м/с, а вблизи прорана и в отверстии железнодорожного моста — до 8 м/с. При образовании прорана на пойме максимальный расход через проран составляет 23500 м^3/с, уровни воды в ближней зоне (выше железной дороги) несколько ниже, чем при проране в русле (около 26 м), скорости течения в русле в ближней зоне незначительные. В связи с конструктивными недостатками дамбы такой сценарий является наиболее вероятным. В статье разработаны технические рекомендации по повышению надежности гидротехнических сооружений Краснодарского водохранилища.

Ключевые слова: противопаводковая система, статические и сейсмические воздействия, техническое состояние, мониторинг, водохозяйственный комплекс

Благодарности: исследование выполнено при поддержке РФФИ и Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 22-17-20001.

Original article

EFFICIENCY OF MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF THE FLOOD PROTECTION SYSTEM IN THE WATER MANAGEMENT COMPLEX OF THE LOWER KUBAN UNDER THE CONDITIONS OF INCREASING STATIC AND SEISMIC IMPACTS

V.A. Volosukhin, M.A. Bandurin, I.A. Prikhodko, Ya.A. Komsyukova
Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

Abstract. The largest object not only in the Kuban, but throughout the entire North Caucasus is the Krasnodar reservoir, which performs the following functions: flood control, navigable, reclamation, fish farming, drinking, desalination, recreational. At present, favorable conditions have developed for carrying out research in the field of monitoring the technical condition of the flood control system and the effectiveness of engineering flood protection systems in the water management complex of the Lower Kuban. This is due to federal and regional support for scientific research aimed at preventing emergencies at hydraulic structures. The article assesses the consequences and magnitude of possible damage from flooding as a result of a hydrodynamic accident at the dam of the Krasnodar reservoir. Calculations of various emergency situations at the Krasnodar hydroelectric complex associated with the destruction of the pressure front have been carried out. The worst of all scenarios is the scenario of the formation of a hole in the channel part of the dam with a hole bottom elevation of 20.0 m and a gap width of up to 800 m. In this case, the maximum flow through the hole is 28000 m^3/s, flood levels in the downstream are higher of the bridge reach 27 m, the speed in the channel reaches 3-4 m/s, and near the breach and in the opening of the railway bridge up to 8 m/s. When a hole is formed on the floodplain, the maximum discharge through the hole is 23500 m^3/s, the water levels in the near zone (above the railway) are somewhat lower than in the case of a hole in the channel (about 26 m), and the flow velocities in the channel in the near zone are insignificant. Due to the design flaws of the dam, this scenario is the most likely. The article develops technical recommendations for improving the reliability of hydraulic structures of the Krasnodar reservoir.

Keywords: flood control system, static and seismic effects, technical condition, monitoring, water management complex

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the Russian Foundation and the Kuban Science Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 22-17-20001.

Введение. Первая очередь Краснодарского водохранилища была введена в эксплуатацию в 1973 г. На 2020 г. объем водохранилища при НПУ (нормальный подпорный уровень) равен 1798,0 млн м^3, заиление — 350,0 млн м^3, подвешенная площадь — 215,0 тыс. га, используемая площадь — 123,0 тыс. га, изъятие за период вегетации — 3344,6 млн м^3.

Краснодарское водохранилище расположено в среднем течении р. Кубань в 248 км от ее устья непосредственно выше Краснодара. Водохранилище с площадью зеркала 383 км^2 (при НПУ) и емкостью при ФУ (форсированный уровень) 2,701 млрд м^3 имеет на данный момент полезную емкость 1,5 млрд м^3, что составляет 30% среднемноголетнего стока паводкового периода. Суммарная длина сооружений напорного фронта составляет около 23 км, в том числе [1]: земляная плотина — 11,4 км, правобережная оградительная дамба — 11,4 м, бетонные сооружения (водосливная плотина, шлюз, водозабор) — в сумме 0,1 км.

В связи с очагами Крымско-Кавказской сейсмичной зоны, простирающейся на дне Черного моря параллельно южному берегу Крыма к устью реки Кубань, через Таманский полуостров и далее через разломную зону Северо-Кавказского прогиба к Большому Кавказу, Краснодарский край относится к сейсмически опасным регионам России [2]. Это обуславливает редкие сильные землетрясения

© Волосухин В.А., Бандурин М.А., Приходько И.А., Комсюкова Я.А., 2022

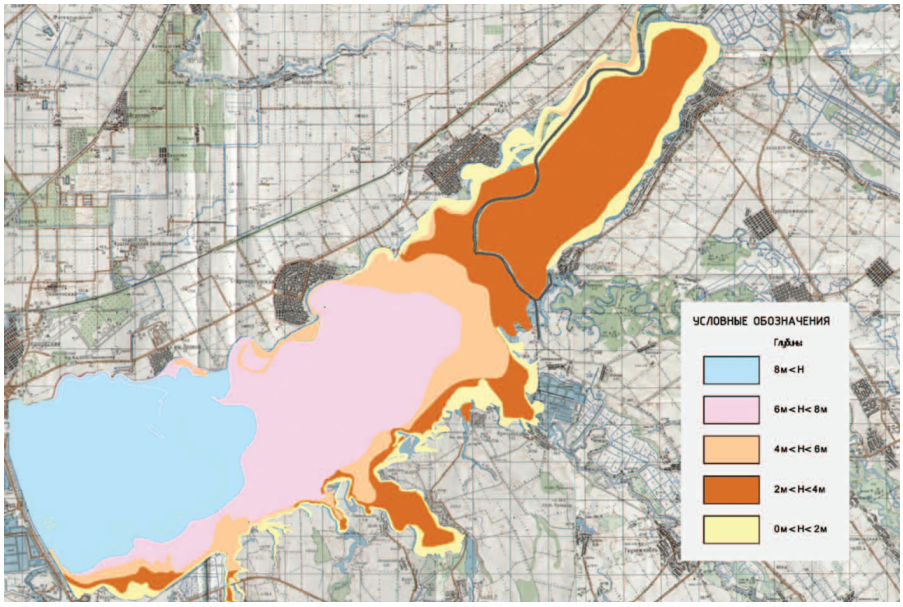

Рисунок 1. **Распределение площадей по глубинам (1978 г.)**
Figure 1. **Distribution of areas by depths (1978)**

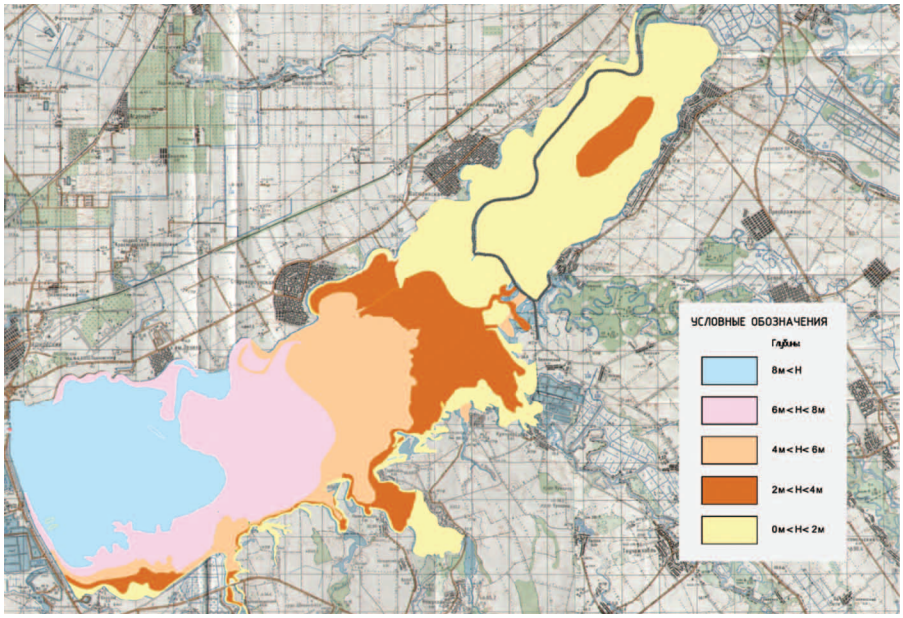

Рисунок 2. **Распределение площадей по глубинам (2016 г.)**
Figure 2. **Distribution of areas by depths (2016)**

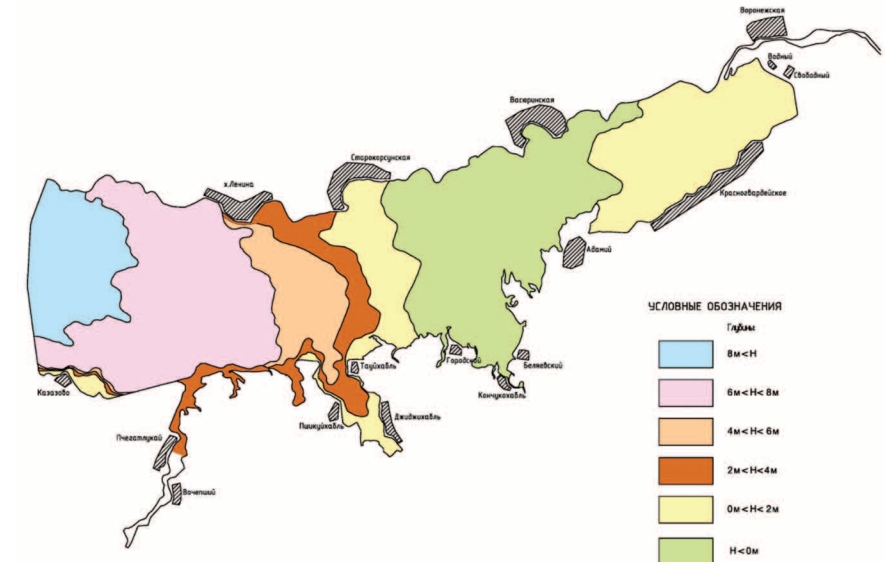

Рисунок 3. **Распределение площадей по глубинам (2035 г.)**
Figure 3. **Distribution of areas by depths (2035)**

интенсивностью до 8 баллов. В большинстве случаев провоцируют землетрясение антропогенные факторы, в том числе это может быть нагрузка на горные породы гидротехнических сооружений. Помимо существующей высокой угрозы землетрясения, осложняет ситуацию прогрессирующий процесс заиление водохранилища, который снижает техническое состояние противопаводковой системы и эффективность системы инженерной защиты от паводков. Так, в настоящее время объем наносов в чаше составляет более 400 млн м^3 с интенсивностью заиления 6-8 млн м^3 в год [3] (рис. 1-3).

Наряду с заилением происходит и зарастание чаши водохранилища, что особенно выражено на глубинах менее 2 м и приводит к ухудшению качества водных ресурсов [4] (рис. 4-7).

Помимо проблем берегоукрепления большую обеспокоенность вызывает и гидроузел, где металлические конструкции тоже находятся в критическом состоянии, что грозит техногенной и экологической катастрофой, а также угрожает десяткам тысяч людей [5].

Следовательно, на сегодняшний день ситуация на Краснодарском водохранилище оценивается как тревожная, а ее решение требует непрерывного мониторинга технического состояния противопаводковой системы, с учетом постоянно меняющихся условий эксплуатации водохранилища [6]. Решение данной проблемы заключается в использовании современных информационно-советующих систем, базирующихся на современных программных продуктах, включающих имитационное математическое моделирование.

Материал и методика исследований. Параметры волны прорыва и зоны возможного затопления в случае гидродинамической аварии на плотине Краснодарского водохранилища, а также при прорыве ограждающих польдеры дамб определены ННПЦ Академии водохозяйственных наук.

При изучении характеристик волны прорыва в нижнем бьефе гидроузла рассматриваемая область разделена на 2 участка: «ближний» нижний бьеф (от плотины до железной дороги в районе г. Краснодара) и «дальний» нижний бьеф (от железной дороги до моря) [7].

Пропускная способность моста на железной дороге недостаточна для пропуска прорывного паводка, и вся левобережная низина, заключенная между плотиной и железной дорогой, окажется затопленной. Максимальные уровни воды как при прорыве на пойме (Q_{max} = 37,5 тыс. м^3/с), так и в русле (Q_{max} = 40 тыс. м^3/с) изменяются от отметки 27 м непосредственно в районе прорана до отметки 24,8 вблизи насыпи железной дороги [8]. На большую глубину будет затоплена левобережная пойма с расположенными на ней населенными пунктами и прибрежная часть г. Краснодара. Затопление основной части г. Краснодара, расположенной на относительно высоких отметках, даже при столь высоких расходах излива маловероятно [9].

Время начала существенного подъема уровней в этой зоне составляет 2 ч при прорыве в аванпорту и 5 ч при прорыве на пойме. Во время прорывного паводка максимальные скорости в проране могут достигать 10 м/с, а под мостом железной дороги — 8 м/с [10]. Большие скорости могут вызвать подмыв опор моста, падение пролетного строения и перекрытие русла, вследствие чего повысятся уровни воды в «ближнем» нижнем бьефе. При ограничении расхода излива до 10-12 тыс. м^3/с условия в «ближнем» нижнем бьефе несколько облегчатся. Однако как прибрежная часть, так и левобережная пойма будут полностью затоплены [11].

Рисунок 4. **Площадь в чаше водохранилища, покрытая древесно-кустарниковой растительностью (1985 г.)**
Figure 4. **Area in the basin of the reservoir, covered with trees and shrubs (1985)**

Рисунок 5. **Площадь в чаше водохранилища, покрытая древесно-кустарниковой растительностью (1998 г.)**
Figure 5. **Area in the basin of the reservoir, covered with trees and shrubs (1998)**

Рисунок 6. **Площадь в чаше водохранилища, покрытая древесно-кустарниковой растительностью (2005 г.)**
Figure 6. **The area in the basin of the reservoir, covered with trees and shrubs (2005)**

Рисунок 7. **Площадь в чаше водохранилища, покрытая древесно-кустарниковой растительностью (2016 г.)**
Figure 7. **Area in the basin of the reservoir covered with trees and shrubs (2016)**

Существенно более легкие условия складываются в «дальнем» нижнем бьефе. В зоне железной дороги затопления весьма велики, максимальные уровни достигают 23,1 м при максимальной аварии и 20,4 м при сохранении ограждения аванпорта, причем глубина затопления в пос. Яблоновском составит 4,7 и 2,0 м соответственно, в левобережной части г. Краснодара — 3,2 и 0,5 м соответственно. Глубины существенно больше вдоль низкого левого берега, где в обоих случаях максимальное затопление превышает 2 м вплоть до ст. Троицкой [12]. На правом берегу в зону затопления попадает часть г. Славянска-на-Кубани, отметки затопления на южной окраине которого достигают 7,7 м. Можно полагать, что северная часть дельты Кубани не будет затоплена. Отрезок времени между началом аварии и началом повышения уровня воды в «дальнем» нижнем бьефе может быть достаточным для эвакуации населения и оперативных противопаводковых мероприятий [13].

Ограничение максимального расхода излива относительно мало сказывается на максимальных уровнях воды на большей части «дальнего» нижнего бьефа, но время распространения паводка значительно замедляется.

Последствия прорыва плотины Краснодарского гидроузла [14], особенно в ее «ближнем» нижнем бьефе оцениваются как весьма тяжелые (рис. 8, 9).

Зона затопления Краснодарского водохранилища в случае возникновения гидродинамической аварии на сооружениях напорного фронта охватывает территорию от г. Краснодара до Азовского моря в пределах долины р. Кубани, древней и современной дельты р. Кубани и Закубанской наклонной террасированной равнины.

На правобережье до ст. Марьянской границу зоны затопления ограничивают аллювиально-лессовые террасы р. Кубани. Граница проходит по южной части г. Краснодара, южнее ст. Елизаветинской и восточное ст. Марьянской. Далее граница зоны затопления поворачивает на север и пересекает первую террасу р. Кубань восточное ст. Новомышастовской [15], а затем проходит по водоразделу б. Сула и б. Косатая. В пределах древней и современной дельты р. Кубани граница затопления проходит по наиболее высоким дамбам и валам оросительных систем восточное ст. Старонижестеблиевской и Староджерелиевской, а также по южной и западной окраинам х. Лебеди. Севернее х. Лебеди зона затопления сливается с Кирпильскими лиманами.

На левобережье граница зоны затопления от створа плотины до Крюковского водохранилища проходит вдоль уступа второй террасы Закубанской наклонной террасированной равнины [16] по северным окраинам а. Тахтамукай, а. Энем, п. Афипский и с. Львовское. Далее, до с. Джигинка, граница зоны затопления проходит вдоль уступа первой террасы южнее ст. Мингрельской и с. Варнавинское, по северным окраинам с. Киевское, х. Адагум, ст. Варениковская и с. Джигинка. От с. Джигинка граница поворачивает на север вдоль насыпи железной дороги г. Крымск — Порт Кавказ и выходит к Ахтанизовскому лиману. Иллюстрирует вышесказанное карта «Границы зон затопления» М 1:200000 [17].

В исследованиях ННПЦ рассмотрены также условия затопления территорий, расположенных ниже отметки НПУ водохранилища (польдеров), при прорыве их ограждающих дамб. Затопление польдеров происходит практически до уровня воды в водохранилище.

Наиболее крупный польдером в водохранилище является левый берег долины р. Псекупс.

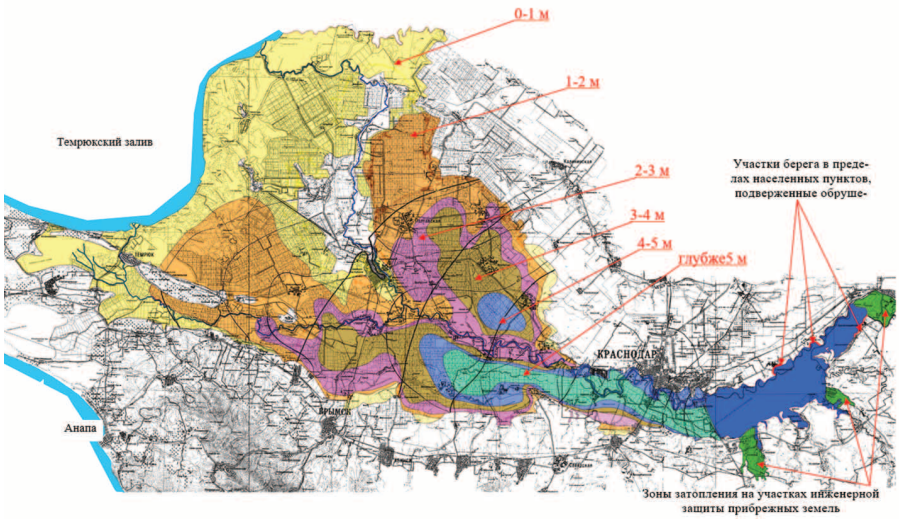

Рисунок 8. **Зоны и уровни затопления при гидродинамической аварии на плотине Краснодарского водохранилища**
Figure 8. **Zones and levels of flooding during a hydrodynamic accident at the dam of the Krasnodar reservoir**

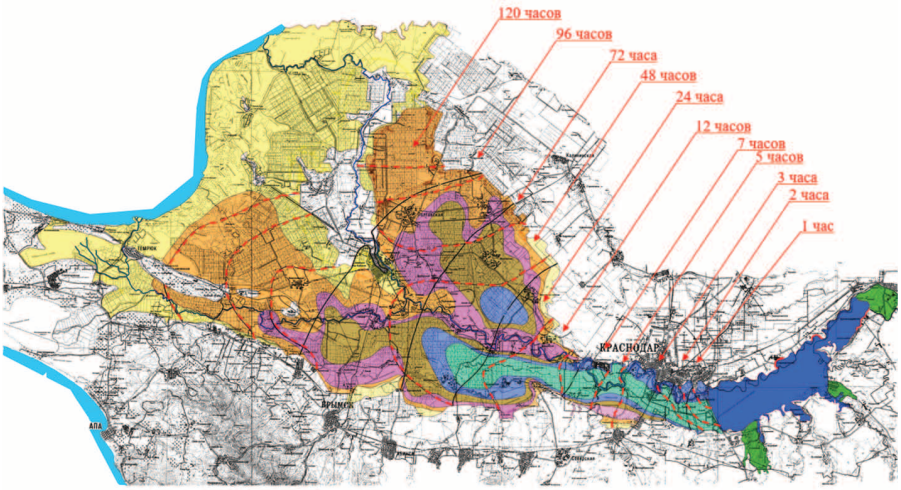

Рисунок 9. **Скорость и уровни затопления при гидродинамической аварии на плотине Краснодарского водохранилища**
Figure 9. **Speed and levels of flooding during a hydrodynamic accident at the dam of the Krasnodar reservoir**

При образовании прорана на участке с отметкой 27,0 м (северный, наиболее низкий участок) полное затопление польдера произойдет приблизительно за 6 ч, уровня размещения населенных пунктов достигаются за 1,5-2 ч. В этой ситуации возможно проведение эвакуации населения [18].

При прорыве дамбы непосредственно у а. Пчегатлукай прорывая волна возникает на его территории фактически мгновенно, скорости достигнут 15 м/с, что приведет к невозможности спасения населения, попавшего в зону затопления.

Долина Хатукай лежит достаточно высоко, на его территории в настоящее время находится один населенный пункт а. Хатукай.

Полное затопление польдера произойдет за 11 ч. При прорыве дамбы возле бывшего х. Водный скорость может достигать 11 м/с.

Полное затопление польдера в долине р. Пшиш произойдет за 7 ч. Скорость в проране достигнет 5 м/с.

Затопление населенных пунктов, расположенных в зоне польдеров на отметках, превышающих уровень воды в Краснодарском водохранилище, из-за заплеска волны прорыва не произойдет. Это связано с высокой шероховатостью поверхности польдеров, покрытых рисовыми чеками и строениями.

При гидродинамической аварии оградительной плотины инженерной защиты долины р. Псекупс граница зоны затопления охватывает долину р. Псекупс с притоками и долины рек Дыш и Четук по горизонтали 33,65 м.

От западной оконечности оградительной дамбы граница затопления идет на юг по склону водораздела р. Дыш и б. Четук до а. Гатлукай. Затем граница проходит по западной окраине а. Гатлукай, охватывает долину р. Четук (до южной окраины а. Псекупс), затем огибает водораздел рек Четук и Псекупс и выходит в долину Псекупс, поворачивая на восток, а затем на север, граница затопления выходит к южным окраинам а. Вочепший.

В административном отношении вся зона затопления располагается в пределах Теучежского района Республики Адыгея.

При гидродинамической аварии оградительной дамбы инженерной защиты зона затопления охватывает правобережную пойму р. Пшиш, не доходя 1 км до ст. Рязанской.

От восточной оконечности оградительной дамбы граница затопления проходит на юг по западной окраине х. Беляевский, а затем вдоль уступа коренного склона долины р. Пшиш. На западе границу затопления ограничивает уступ второй надпойменной террасы, вдоль которой протекает р. Пшиш.

В административном отношении граница затопления располагается в пределах Белореченского района Краснодарского края.

При гидродинамической аварии оградительной дамбы инженерной защиты участка № 12 будут затоплены земли в долинах рек Кубань, Лаба и Псенафа.

От южной оконечности Восточной дамбы граница зоны затопления проходит на юго-восток вдоль уступа долины р. Псенафа. В районе пересечения долины с автомобильной дорогой Усть-Лабинск — Майкоп граница поворачивает на восток, доходя до оградительного вала вдоль русла р. Лаба.

Вдоль вала граница идет на север до а. Хатукай, а затем по восточным окраинам аула выходит к р. Кубань.

В административном отношении зона затопления располагается в пределах Красногвардейского района Республики Адыгея.

Результаты и их обсуждение. Гидродинамическая авария на плотине Краснодарского водохранилища вызовет катастрофическое затопление территории Нижней Кубани. В зоне затопления окажутся 122 населенных пункта, 350 тыс. га сельхозугодий, около 350 производственных объектов и сооружений, десятки километров автомобильных и железных дорог, различные гидротехнические сооружения, ряд промышленных и экологически опасных предприятий и объектов [19, 20].

Последствия определяются сценарием развития событий, расходом воды, временем формирования и прохождения волны прорыва и затопления в нижнем бьефе, сопутствующими условиями, эффективностью функционирования системы оповещения и эвакуации при аварии. Число жертв в нижнем бьефе гидроузла при наличии раннего оповещения (по данным Бюро мелиорации США) может составить при оповещении за 15 минут до затопления 50% от числа попавших в зону аварии. При времени оповещения от 15 минут до 1,5 часов число жертв среди населения составит $N^{0,6}$ (где N — число людей, попавших в зону аварии). При времени оповещения более 2 ч число жертв составит 2% на каждые 10 тыс. человек, находящихся в зоне затопления.

При различных сценариях аварии наиболее тяжелые последствия для населения будут иметь место на участке плотина-железная дорога: число жертв от 2 до 50% от числа оказавшихся в зоне аварии и полное уничтожение материальных ценностей.

При прохождении ударной волны часть зданий, а в 1-2-часовой зоне прохождения прорывной волны большинство зданий будет разрушено. Другим жилым, производственным и общественным зданиям в зоне затопления прорывной волной наносится ущерб в результате частичных повреждений стен, полов, других конструкций и элементов. Наибольший ущерб будет нанесен одноэтажным зданиям и подвальным помещениям. Затопленное производственное оборудование и инвентарь, домашнее имущество и имущество различных организаций, объектов соцкультбыта подвергаются порче и часто становятся непригодным к дальнейшему использованию.

Наносится урон сетям электроснабжения, связи, водопровода, канализации и газоснабжения, канализационным насосным станциям, водозаборам и очистным сооружениям.

Гибнет до 100% домашнего скота и птицы, а в вегетационный период — до 100% сельскохозяйственной продукции. Часть населения в 3-5-часовой зоне прорывной волны погибнет. Значительной части людей в этой зоне будет нанесен большой ущерб здоровью: физические травмы, переохлаждение, стресс. Могут возникнуть эпидемические заболевания из-за ухудшения санитарно-гигиенических условий в местах проживания.

Ущерб сельскохозяйственному производству будет особенно велик в случае затопления в летний период, когда все культуры находятся в стадии развития, а повторные посевы уже невозможны. Не выдержат затопления более суток в зимний и весенний период озимые и яровые культуры.

При затоплении будут повреждены мелиоративные системы (каналы, сооружения на них, насосные станции, водозаборы), которые распространены в Нижней Кубани. Повсеместно будет разрушена система обвалования Нижней Кубани.

На сельскохозяйственных объектах и сооружениях будут повреждены здания, оборудование, инвентарь, механизмы, различное сырье, в том числе и сельскохозяйственное. Размещение в зоне затопления более 130 животноводческих ферм вызовет массовую гибель скота и птицы.

Затопление дорог приведет к размыву земляного полотна, повреждению дорожной одежды и верхнего строения железнодорожных путей, к подмыву опор и разрушению мостов, особенно на автомобильных дорогах.

В результате размыва русел или обрушения берегов на участках переходов различных трубопроводов в том числе нефте- и газопроводов через водотоки возможны их разрушения.

На промышленных предприятиях, попавших в зону затопления, будут повреждены или разрушены здания и сооружения, оборудование и механизмы, внутренние коммуникации. Произойдет повреждение или утрата сырья и готовой продукции на внутренних складках.

При затоплении и разрушении производственных объектов и сооружений во время прохождения паводка произойдет загрязнение вод, а в ряде случаев атмосферы и земель различными веществами. Наибольшую экологическую опасность представляют предприятия химической и нефтеперерабатывающей промышленности, машиностроения, нефте- и газодобычи, нефтебазы и АЗС, животноводческие объекты и склады ядохимикатов и удобрений.

Прорыв оградительной плотины инженерной защиты долины р. Псекупс приведет к затоплению 3,4 тыс. га земель, будут затоплены 2 населенных пункта, а также участок автомобильной дороги Краснодар — Майкоп. Гибель людей вероятна.

При прорыве оградительной дамбы инженерной защиты участка № 11 будут затоплены 1,35 тыс. га земель, в том числе 0,59 тыс. га сельхозугодий. Гибель людей маловероятна.

Прорыв оградительной дамбы инженерной защиты участка № 12 приведет к затоплению 3,8 тыс. га земель, в том числе 3,3 тыс. га сельхозугодий, 4 населенных пунктов, нескольких сельскохозяйственных объектов и участка автомобильной дороги Усть-Лабинск — Майкоп.

В результате гидродинамической аварии возможен экономический и социальный ущерб физическим и юридическим лицам, а также нарушения в природной среде (экологический ущерб).

Экономический ущерб включает прямые потери имущества, скота, готовой продукции, затрат на незавершенное производство; затраты, необходимые на восстановление разрушенных и нарушенных зданий и сооружений производственного, транспортного, жилищно-коммунального и социально-культурного назначения, коммуникаций, защитных сооружений; затраты на устранение загрязнения и заражения окружающей среды; а также затраты на восстановление функционирования водохранилища для противопаводковой защиты земель, водоснабжения населения, обеспечения водными ресурсами других потребителей, либо на создание других систем, принимающих на себя функции водохранилища.

Косвенный ущерб включает в себя неполученные в результате вынужденной остановки производства доходы физических и юридических лиц.

Социальный ущерб наносится населению в связи с гибелью и заболеванием, стрессовыми потрясениями многих пострадавших в аварии людей, потерей жилья, имущества, дискомфортными условиями проживания и жизнеобеспечения, резкого сокращения доходов населения на длительный период времени и т.д.

Экологический ущерб связан с загрязнением окружающей среды при разрушении и повреждении прорывной волной экологически опасных объектов — химических и нефтеперерабатывающих предприятий, складов ядохимикатов и минеральных удобрений, складов ГСМ, очистных сооружении, нефтепроводов и т.д., а также в связи с возможной эрозией почв, разрушением воспроизводственных рыбохозяйственных объектов, гибелью диких животных и птиц, резким ухудшение условий в их местообитаниях.

В предыдущей Декларации безопасности Краснодарского водохранилища был выполнен расчет ущерба в случае гидродинамической аварии, основанный на материалах федеральной целевой программы «Защита от затопления и подтопления городов, населенных пунктов, объектов народного хозяйства, ценных земель на территории Российской Федерации. Бассейн Кубани».

Экономические потери были оценены, исходя из полной стоимости предприятий и объектов:

- для промышленных предприятий — 10%;
- для зданий, жилой застройки и социальной инфраструктуры — 10%, плюс вспомогательные помещения — 50% от площади, плюс стоимость личного имущества — 2500 руб. на семью в ценах 1991 г.;
- для сельскохозяйственного производства — 10%;
- для сельского хозяйства — 80%;
- для транспорта — 20%;
- разное — 10%.

Применялись также оценочные коэффициенты, исходя от действия волны разной высоты: от 10 до 4-2.

В таблице приведена оценка экономического ущерба в случае гидродинамической аварии на Краснодарском водохранилище.

Затраты на восстановление сооружений Краснодарского водохранилища оценены в размере 30,0 млн руб. (1991 г.) или 900 млн руб. (2005 г.).

При гидродинамических авариях на оградительных плотинах и дамбах величина прямого ущерба составит:

- в долине р. Псекупс — 26,0 млн руб. (1991 г.) или 780 млн руб. (2005г.);
- на участке № 11 — 2,3 млн руб. (1991 г.) или 69,0 млн руб. (2005 г.);
- на участке № 12 — 55,6 млн руб. (1991 г.) или 1668 млн руб. (2005г.).

С учетом косвенных потерь величина ущерба значительно возрастет. В этом случае около половины из 203 тыс. га рисовых ОС в течение периода их восстановления и восстановления Краснодарского водохранилища (не менее двух лет) будут полностью изъяты из производства; в связи с длительной потерей дренажного водозабора придется строить дополнительные водозаборы для поддержания хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Краснодара и т.д.

Таблица. **Оценка экономического ущерба в случае гидродинамической аварии на Краснодарском водохранилище**
Table. **Assessment of economic damage in the event of a hydrodynamic accident at the Krasnodar reservoir**

Показатели	Экономический ущерб, млн руб.	
	в ценах 1991 г.	в ценах I кв. 2005 г.
Краснодарский край		
Социальная инфраструктура	3125	93781
Промышленность	2233	67012
Сельское хозяйство	1616	48496
Транспорт	25	750
Разное	178	5343
Итого	7177	215382
Республика Адыгея		
Социальная инфраструктура	570	17106
Промышленность	600	18006
Сельское хозяйство	285	8553
Транспорт	5	150
Разное	77	2310
Итого	1537	46125

Выводы. Для обеспечения и в дальнейшем безопасной работы Краснодарского водохранилища, находящегося в длительной эксплуатации, уменьшения риска аварий рекомендуется выполнить следующие мероприятия.

Земляная плотина:

1. Подсыпка гребня до проектных отметок.
2. Своевременный ремонт железобетонного крепления верхового откоса и температурно-осадочных швов.
3. Завершение реконструкции вертикального дренажа.
4. Проверка состояния водовыпусков горизонтального дренажа и, в случае необходимости, их замена.
5. Замена насосного оборудования насосных станций НС-1 и НС-22, расчистка их аванкамер.
6. Усиление зданий НС-1 и НС-2.

Водосбросное сооружение с рыбоподъемником:

1. Выполнение лабораторных исследований в нижнем бьефе, связанных с обеспечением безопасности пропуска больших расходов.
2. Ремонт затворов в соответствии с рекомендациями СПТКБ «Ленгидросталь» и выполнение поверочных расчетов прочности металлоконструкций с учетом фактических толщин металла.
3. Выполнение пригрузки каменной призмой секции ПС-4 сопрягающих подпорных стенок нижнего бьефа для обеспечения ее устойчивости при сейсмических воздействиях.
4. Включение в работу скважин вертикального дренажа возле стенок нижнего бьефа для поддержания установленного декларацией безопасности остаточного напора.
5. Выполнение обследования подводных частей водосброса в нижнем бьефе один раз в 5 лет, а также после каждого паводка, превышающего максимальный из предшествующих.
6. Выполнение модернизации автоматики управления основными затворами.

Судоходный шлюз:

1. Выполнение реконструкции горизонтального дренажа с целью увеличения его эффективности.
2. Замена плоских колесных и рабочих двухстворчатых ворот; выполнение поверочных расчетов для возможности их эксплуатации в период до замены, а также ряда ремонтных мероприятий по рекомендациям СПТКБ «Ленгидросталь».
3. Включение в работу скважин вертикального дренажа возле пал и причалов нижнего бьефа для поддержания установленного настоящей декларацией остаточного напора.

Водозабор на ПК 2+30 земляной плотины:

1. Расчистка канала-прорези в верхнем бьефе и отводящего канала.
2. Замета системы управления затворами.

Инженерная защита правого берега р. Кубани:

1. Подсыпка гребня дамбы до проектных отметок.
2. Капитальный ремонт железобетонного крепления правого берега и температурно-осадочных швов.
3. Выполнение реконструкции скважин вертикального дренажа и замены водовыпусков.

Инженерная защита долины р. Псекупс:

1. Выполнение топосъемки оградительной плотины.
2. Подсыпка гребня левобережной и правобережной дамб обвалования до проектных отметок и восстановления крепления их верховых откосов.
3. С целью реконструкции дренажной системы проведение исследований для определения способа оптимизировать ее техническую эффективность.

Инженерная защита долины р. Пшиш и х. Городского:

1. Реконструкция поперечной и продольной дамб обвалования р. Пшиш.
4. Реконструкция с увеличением производительности насосной станции «Фокино-2» (долина р. Пшиш).
5. Расчистка дренажного канала у х. Городского.

Инженерная защита участка № 12 (долина «Хатукай»):

1. Расчистка русла р. Кубани.
2. Реконструкция дренажного канала ДС-1.
3. Проведение исследований для определения параметров дренажной системы с целью ее реконструкции.

Система мониторинга за состоянием сооружений:

Существующая система мониторинга была введена для постоянной оценки состояния гидротехнических сооружений и объектов водохранилища. Главный источник этой информации — измерительная аппаратура, хотя обязательный визуальный контроль также важен. К настоящему времени на сооружениях КИА частично утеряна, частично оказалась в неработоспособном состоянии. Современное состояние КИА и отсутствие некоторых ее видов в системе мониторинга предопределяют необходимость ее реконструкции.

В 1998 г. АООТ «ВНИИГ им. Веденеева» разработал «Рекомендации по составу натурных наблюдений и КИА в системе мониторинга состояния гидротехнических сооружений напорного фронта Краснодарского водохранилища». Согласно этим рекомендациям, существующая сеть КИА должна быть расширена и дополнена такими элементами: датчики давления воды с измерительными пультами — на земляной плотине, отсыпанной из суглинков, и на водозаборе на ПК 23+50 вместо трубчатых пьезометров в скважинах; водомерные посты, оснащенные мерными водосливами — в смотровых колодцах закрытого коллектора для дифференцированного (по участкам) измерения фильтрационных расходов через плотину и ее основание; опорные знаки визирного створа — на судоходном шлюзе.

Система пьезометров, высотных марок, щелемеров должна быть полностью восстановлена в соответствии с первоначальным ее размещением, может быть, с несколько упрощением.

Для изучения гидрометеорологического режима водохранилища необходимо:

– возобновить наблюдения за волнением на водохранилище, за переработкой берегов, заилением по программе Краснодарской озерной гидрометеостанции;
– открыть 2 водомерных поста — в ст. Васюринской и в устье р. Псекупс.

На гидротехнических сооружениях Краснодарского водохранилища, расположенных в сейсмоопасном районе, должны проводиться регулярные инженерно-сейсмометрические наблюдения. Для этого сооружения должны быть оборудованы автоматизированными приборами и комплексами, позволяющими регистрировать кинематические характеристики во время землетрясений и оперативно обрабатывать полученную информацию. В качестве такого комплекса может быть использована система наблюдения динамических процессов AQS разработки АООТ «ВНИИГ им. Веденеева».

Список источников

1. Дубенок Н.Н., Бенин Д.М., Мочунова Н.А. Роль института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова в становлении и развитии мелиорации страны // Природообустройство. 2020. № 5. С. 6-17.

2. Кирейчева Л.В., Носов А.К., Юрченко И.Ф. Приоритетные направления развития инновационных технологий в орошении // Современные проблемы мелиорации и водного хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию ВНИИГиМа, Москва, 01 января-31 декабря 2009 г. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2009. С. 76-85.

3. Юрченко И.Ф. Информационные технологии и организация информационных ресурсов управления агроэкосистемами: прошлое, настоящее, будущее // Modern Science. 2019. № 12-2. С. 13-16.

4. Кирейчева Л.В., Карпенко Н.П., Хохлова О.Б. Новые технологии проектирования, обоснования строительства, эксплуатации и управления мелиоративными системами. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2010. 240 с.

5. Волосухин В.А., Бандурин М.А. Необходимость многофакторной диагностики Донской шлюзованной системы в условиях роста дефицита водных ресурсов и безопасности сооружений // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 2. С. 346-354.

6. Бандурин М.А., Волосухин В.А. Мониторинг сооружений водного хозяйства // Инновационные пути развития агропромышленного комплекса: задачи и перспективы, Зерноград, 25-26 октября 2012 г. / Правительство Ростовской области, Министерство сельского хозяйства и продовольствия; ФГБОУ ВПО АЧГАА. Зерноград, 2012. С. 98-101.

7. Safronova, T.I., Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A., Sergeyev, A.E. (2020). *Optimization problem in mathematical modeling of technological processes of economic activity on rice irrigation systems*. E3S Web of Conferences: 8, Rostov-on-Don, August 19-30, 2020. Rostov-on-Don, p. 05014. doi: 10.1051/e3sconf/202021005014

8. Safronova, T.I., Degtyareva, O.G., Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A. (2018). Price characteristics of the project to construct the precipitation runoff system regulation. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 9, no. 6, pp. 1845-1852.

9. Кружилин И.П., Ганиев М.А., Родин К.А., Кузнецова Н.В. Менее водозатратная и экологически предпочтительная технология орошения риса периодическими поливами // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 2 (54). С. 49-55.

10. Кузнецов Е.В., Хаджиди А.Е., Приходько И.А. Способ подготовки почвы к посеву риса в паровом поле рисового севооборота // Патент № 2457650 C1 Российская Федерация, МПК A01B 79/02, A01G 16/00. № 2010153809/13: заявл. 27.12.2010: опубл. 10.08.2012; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет». 6 с.

11. Юрченко И.Ф. Технологии прецизионного управления мелиоративным режимом агроэкосистем // В сборнике: Научно-методическое обеспечение развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса: сборник научных трудов. М., 2020. С. 222-233.

12. Ольгаренко В.И., Юрченко И.Ф., Ольгаренко И.В. Обоснование эффективности планирования технологических процессов водопользования и оперативное управление водораспределением на базе использования метода Монте-Карло // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 1 (29). С. 49-65.

13. Bandurin, M.A., Volosukhin, V.A., Vanzha, V.V. (2018). Technology for water economy monitoring of technical state of closed drainage on irrigation systems. *Materials Science Forum*, vol. 931, pp. 214-218.

14. Volosukhin, V.A., Bandurin, M.A., Vanzha, V.V. (2018). Numerical analysis of static strength for different damages of hydraulic structures when changing stressed and strained state. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 — Enterprise Information Systems*. Tomsk, Institute of Physics Publishing, p. 042061.

15. Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A., Safronova, T.I., Chebanova, E.F. (2020). *Water regime formation of river basins in the delta zone on the example of the Azov region*. E3S Web of Conferences: 13, Rostov-on-Don, February 26-28, 2020. Rostov-on-Don, p. 12010. doi: 10.1051/e3sconf/202017512010

16. Кружилин И.П., Ганиев М.А., Кузнецова Н.В., Родин К.А. Водопотребление риса и удельные затраты на формирование урожая зерна при разных способах полива // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 1 (49). С. 108-117.

17. Юрченко И.Ф., Носов А.К. О критериях и методах контроля безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного водохозяйственного комплекса // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сборник научных трудов. 2014. № 53. С. 158-165.

18. Карпенко Н.П., Юрченко И.Ф. Классификация мероприятий безопасной эксплуатации мелиоративных систем // Природообустройство. 2016. № 1. С. 58-62.

19. Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A., Verbitsky, A.Y. (2019). Justification of rice watering methods and crop cultures. *Journal of Agriculture and Environment*, no. 1 (9), p. 15. doi: 10.23649/jae.2019.1.9.15

20. Чеботарев М.И., Приходько И.А. Способ мелиорации почвы рисовой оросительной системы к посеву риса // Патент № 2482663 C2 Российская Федерация, МПК A01G 16/00.: № 2011123829/13: заявл. 10.06.2011: опубл. 27.05.2013; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет». 6 с.

References

1. Dubenok, N.N., Benin, D.M., Mochunova, N.A. (2020). Rol' instituta melioratsii, vodnogo khozyaistva i stroitel'stva imeni A.N. Kostyakova v stanovlenii i razvitii melioratsii strany [The role of the Institute of Land Reclamation and Water Resources and Construction named after A.N. Kostyakova in the formation and development of land reclamation of the country]. *Prirodoobustroistvo* [Environmental engineering], no. 5, pp. 6-17.

2. Kireicheva, L.V., Nosov, A.K., Yurchenko, I.F. (2009). Prioritetnye napravleniya razvitiya innovatsionnykh tekhnologii v oroshenii [Priority directions for the development of innovative technologies in irrigation]. *Sovremennye problemy melioratsii i vodnogo khozyaistva: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu VNIIGIMa, Moskva, 01 yanvarya-31 dekabrya 2009 g.* [Modern problems of melioration and water management: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of VNIIGiMa, Moscow, January 01-December 31, 2009. Moscow: All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, pp. 76-85.

3. Yurchenko, I.F. (2019). Informatsionnye tekhnologii i organizatsiya informatsionnykh resursov upravleniya agroekosistemami: proshloe, nastoyashchee, budushchee [Information technology and organization of information resources for agroecosystem management: past, present, future]. *Modern Science*, no. 12-2, pp. 13-16.

4. Kireicheva, L.V., Karpenko, N.P., Khokhlova, O.B. (2010). *Novye tekhnologii proektirovaniya, obosnovaniya stroitel'stva, ehkspluatatsii i upravleniya meliorativnymi sistemami* [New technologies for design, justification of construction, operation and management of land reclamation systems]. Moscow, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 240 p.

5. Volosukhin, V.A., Bandurin, M.A. (2017). Neobkhodimost' mnogofaktornoi diagnostiki Donskoi shlyuzovannoi sistemy v usloviyakh rosta defitsita vodnykh resursov i bezopasnosti sooruzhenii [The need for multifactorial diagnostics of the Donskoy sluice system in the conditions of growing water resources deficit and the safety of facilities]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, vol. 9, no. 2, pp. 346-354.

6. Bandurin, M.A., Volosukhin, V.A. (2012). Monitoring sooruzhenii vodnogo khozyaistva [Monitoring of water facilities]. *Innovatsionnye puti razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: zadachi i perspektivy, Zernograd, 25-26 oktyabrya 2012 g.* [Innovative ways of development of the agro-industrial complex: tasks and prospects, Zernograd, October 25-26, 2012]. Zernograd, pp. 98-101.

7. Safronova, T.I., Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A., Sergeyev, A.E. (2020). *Optimization problem in mathematical modeling of technological processes of economic activity on rice irrigation systems*. E3S Web of Conferences: 8, Rostov-on-Don, August 19-30, 2 020. Rostov-on-Don, p. 05014. doi: 10.1051/e3sconf/202021005014

8. Safronova, T.I., Degtyareva, O.G., Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A. (2018). Price characteristics of the project to construct the precipitation runoff system regulation. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 9, no. 6, pp. 1845-1852.

9. Kruzhilin, I.P., Ganiev, M.A., Rodin, K.A., Kuznetsova, N.V. (2019). Menee vodozatratnaya i ehkologicheski predpochtitel'naya tekhnologiya orosheniya risa periodicheskimi polivami [Less water-intensive and environmentally preferable technology for irrigating rice with periodic irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education], no. 2 (54), pp. 49-55.

10. Kuznetsov, E.V. Khadzhidi, A.E. Prikhod'ko, I.A. (2012). *Sposob podgotovki pochvy k posevu risa v parovom pole risovogo sevooborota* [Method of soil preparation for sowing rice in a fallow field of rice crop rotation]. Applicant and patentee Kuban GAU. No. 2010153809/13; app. 12/27/2010; publ. 10.08.2012, 6 p.

11. Yurchenko, I.F. (2020). Tekhnologii pretsizionnogo upravleniya meliorativnym rezhimom agroehkosistem [Technologies for precision management of the reclamation regime of agroecosystems]. *V sbornike: Nauchno-metodicheskoe obespechenie razvitiya* meliorativno-vodokhozyaistvennogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov [In the collection: Scientific and methodological support for the development of a reclamation and water management complex. Collection of scientific papers]. Moscow, pp. 222-233.

12. Ol'garenko, V.I., Yurchenko, I.F., Ol'garenko, I.V. (2018). Obosnovanie ehffektivnosti planirovaniya tekhnologicheskikh protsessov vodopol'zovaniya i operativnoe upravlenie vodoraspredeleniem na baze ispol'zovaniya metoda Monte-Karlo [Substantiation of the efficiency of planning technological processes of water use and operational management of water distribution based on the use of the Monte Carlo method]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii* [Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems], no. 1 (29), pp. 49-65.

13. Bandurin, M.A., Volosukhin, V.A., Vanzha, V.V. (2018). Technology for water economy monitoring of technical state of closed drainage on irrigation systems. *Materials Science Forum*, vol. 931, pp. 214-218.

14. Volosukhin, V.A., Bandurin, M.A., Vanzha, V.V. (2018). Numerical analysis of static strength for different damages of hydraulic structures when changing stressed and strained state. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 — Enterprise Information Systems*. Tomsk, Institute of Physics Publishing, p. 042061.

15. Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A., Safronova, T.I., Chebanova, E.F. (2020). *Water regime formation of river basins in the delta zone on the example of the Azov region*. E3S Web of Conferences: 13, Rostov-on-Don, February 26-28, 2020. Rostov-on-Don, p. 12010. doi: 10.1051/e3sconf/202017512010

16. Kruzhilin, I.P., Ganiev, M.A., Kuznetsova, N.V., Rodin, K.A. (2018). Vodopotreblenie risa i udel'nye zatraty na formirovanie urozhaya zerna pri raznykh sposobakh poliva [Rice water consumption and unit costs for grain yield formation with different irrigation methods]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education], no. 1 (49), pp. 108-117.

17. Yurchenko, I.F., Nosov, A.K. (2014). O kriteriyakh i metodakh kontrolya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii meliorativnogo vodokhozyaistvennogo kompleksa [On the criteria and methods for monitoring the safety of hydraulic structures of the reclamation water management complex]. *Puti povysheniya ehffektivnosti oroshaemogo zemledeliya: sbornik nauchnykh trudov* [Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture: collection of scientific papers], no. 53, pp. 158-165.

18. Karpenko, N.P., Yurchenko, I.F. (2016). Klassifikatsiya meropriyatii bezopasnoi ehkspluatatsii meliorativnykh sistem [Classification of measures for the safe operation of reclamation systems]. *Prirodoobustroistvo* [Environmental engineering], no. 1, pp. 58-62.

19. Vladimirov, S.A., Prikhodko, I.A., Verbitsky, A.Y. (2019). Justification of rice watering methods and crop cultures. *Journal of Agriculture and Environment*, no. 1 (9), p. 15. doi: 10.23649/jae.2019.1.9.15

20. Chebotarev, M.I., Prikhod'ko, I.A. (2013). *Sposob melioratsii pochvy risovoi orositel'noi sistemy k posevu risa* [The method of soil reclamation of the rice irrigation system for sowing rice]. Applicant and patentee Kuban GAU. No. 2011123829/13; app. 06/10/2011; publ. 05.27.2013, 6 p.

Информация об авторах:

Волосухин Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации,
Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор кафедры сопротивления материалов,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9029-7802, director@ibgts.ru

Бандурин Михаил Александрович, доктор технических наук, доцент, Заслуженный изобретатель Российской Федерации, декан факультета гидромелиорации,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0986-8848, chepura@mail.ru

Приходько Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4855-0434, prihodkoigor2012@yandex.ru

Комсюкова Яна Алексеевна, обучающаяся 4 курса бакалавриата факультета гидромелиорации,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8774-7216, komsyukovay@mail.ru

Information about the authors:

Viktor A. Volosukhin, doctor of technical sciences, professor, Honored worker of science of the Russian Federation,
Honorary worker of higher professional education of the Russian Federation, professor of the department of strength of materials,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9029-7802, director@ibgts.ru

Mikhail A. Bandurin, doctor of technical sciences, associate professor, Honored inventor of the Russian Federation, dean of the faculty of hydroreclamation,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0986-8848, chepura@mail.ru

Igor A. Prikhodko, candidate of technical sciences, associate professor, acting head of the department of construction and operation of water facilities,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4855-0434, prihodkoigor2012@yandex.ru

Yana A. Komsyukova, 4th year undergraduate student of the faculty of hydromelioration,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8774-7216, komsyukovay@mail.ru

✉ **prihodkoigor2012@yandex.ru**