

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.343>

УДК 627.8.058.22.:711.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

Кобяк В.В., Миканович Д.С., Журов М.М.

Цель. Провести анализ методов по определению риска возникновения гидродинамических аварий на гидротехнических сооружениях различного типа (водохранилищ, шламоохранилищ, водоемов технического назначения и др.). Обосновать основные направления по улучшению системы обеспечения безопасности и надежности гидротехнических сооружений.

Методы. Метод теоретического анализа литературных источников применен при проведении оценки нормативно-правовой базы стран мира по оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях различного типа. Выполнена обработка полученных результатов с использованием метода оценивания и теоретического обобщения полученных данных.

Результаты. Установлено, что существующие методики оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях различного типа (водохранилища, шламоохранилища, водоемы технического назначения и др.) сложны, громоздки и трудоемки в использовании из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных. В связи с этим требуется разработка методики оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях с учетом их конструктивных особенностей.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы при комплексной оценке состояния гидротехнических сооружений Министерством природных ресурсов, а также Министерством по чрезвычайным ситуациям при разработке средне- и долгосрочных прогнозов возникновения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: безопасность гидротехнических сооружений, риск возникновения чрезвычайных ситуаций, дамба, плотина, мониторинг, критерии безопасности, гидродинамическая авария.

(Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.)

Введение

Актуальность исследований по вопросам оценки рисков аварий на гидротехнических сооружениях (ГТС) обусловлена произошедшими за последние 20 лет тяжелыми авариями на крупных гидроэлектростанциях (ГЭС) и плотинах Российской Федерации (Саяно-Шушенская ГЭС, 2009), США (плотина Оровилл, 2018), Бразилии (дамба Брумадиньо, 2019), Колумбии (ГЭС Итуанго, 2018) и других странах мира [1] (табл. 1).

Причины аварий на ГТС многогранны:

1) человеческий фактор (ошибки при проектировании и строительстве, авиаудары и т.д.);

2) природные условия (разнообразие климатических, топографических, геологических, гидрогеологических факторов и условий в створах плотин, а также их неблагоприятное сочетание);

3) катаклизмы (сверхрасчетные (катастрофические) паводки, горные обвалы), что создает сложности при прогнозировании гидродинамических аварий, оценке условий жизнедеятельности населения и функционирования объектов экономики при их возникновении.

Несмотря на то что ГТС, построенные в странах с различными природными условиями, зарекомендовали себя устойчивыми и долговечными сооружениями, мировая статистика и события последних лет свидетельствуют о том, что возможность их повреждений и разрушений исключать нельзя. Вероятность возникновения гидродинамических аварий на

ГТС порядка 10^{-3} – 10^{-5} 1/год допускают многие современные нормы проектирования различных стран^{1, 2}.

Таблица 1. – Наиболее крупные гидродинамические аварии в мире [1]

Название плотины	Год разрушения, страна	Причины разрушения	Количество пострадавших, чел.	Количество погибших, чел.	Последствия
Байлес	1902, США	ошибки при строительстве	1500	100	смыто 5 деревень
Сен-Френис	1928, США	ошибки в проекте	–	421	ущерб 150 млн долларов США
Речная дамба (р. Янцзы)	1931, Китай	катастрофический паводок	40 млн	140 тыс.	затоплено 55 000 км ²
Зербино	1935, Италия	катастрофический паводок	–	130	ущерб 12 млн долларов США
ДнепроГЭС	1942, Украина	разрушения после взрыва ГЭС	–	несколько тыс.	разрушена плотина
Мольпасье	1959, Франция	катастрофический паводок	3100	500	ущерб 68 млн долларов США
Орос	1960, Бразилия	катастрофический паводок	2000	150	разрушено 50 населенных пунктов
Болдуни Хилз	1963, США	катастрофический паводок	800	300	ущерб 11 млн долларов США
Вайонт	1963, Италия	горный обвал	–	более 4000	полное разрушение ГТС
Байньцяо	1975, Китай	катастрофический паводок	11 млн	171 тыс.	разрушено около 6 млн домов
Гондо	2000, Швейцария	обильный паводок	25	–	плотина разрушена
«Большая вода» (р. Эльба)	2002, Германия	катастрофический паводок	–	–	затоплено 19 департаментов

Основная часть

Вероятность аварий на ГТС имеет тенденцию роста, особенно после их эксплуатации более 40–50 лет³. Так, Комитетом по авариям и разрушениям Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) были приведены данные более чем за 150-летний период по авариям на ГТС в 43 странах мира. Исходя из анализа данных⁴, в мире по разным причинам на плотинах происходит свыше 300 аварий, нередко с большим материальным ущербом и человеческими жертвами.

Наибольшее число аварий отмечено на грунтовых плотинах, при этом повреждения основания составили 25 %, тела плотины – 47 %, водосбросов – 23 % и прочие повреждения – 5 %⁵. Аварии бетонных плотин происходили из-за повреждения основания, а на каменных – из-за дефектов строительных материалов. В зависимости от типа плотин в таблице 2 указана доля распределения аварий на ГТС [2].

¹ Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов / Открытое акционерное общество ордена Трудового Красного Знамени комплексный научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии. – Москва, 2002. – 12 с.

² ICOLD (International Commission on Large Dams), Bulletin 99, Dam Failures, Statistical Analysis, Commission Internationale des Grands Barrages. – 1995. Paris. – 73 p.

³ См. сноску 2.

⁴ См. сноску 2.

⁵ Методика оперативного прогнозирования инженерных последствий прорыва гидроузлов / С.М. Нигметов [и др.] // Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям и подготовки населения и специалистов к действиям в чрезвычайных условиях: тез. Междунар. симпозиума, Москва, 4 июня 1999 г. – С. 441–442.

Таблица 2. – Доля аварий на ГТС в зависимости от их типа

Тип плотины	Доля, %
Земляная	53
Бетонная гравитационная	23
Плотины других типов	17
Защитная дамба из местных материалов	4
Арочная железобетонная	3

Из зарегистрированных аварий 62 % происходило до начала эксплуатации водохранилищ, а также в период ввода их в эксплуатацию. Основные причины аварий:

- 1) перелив паводковых вод через недостроенные сооружения;
- 2) заполнение водохранилища в период строительства;
- 3) проявление неосторожности при нагружении плотин [2].

В таблице 3 представлено процентное соотношение аварий в зависимости от причины их возникновения [1].

Таблица 3. – Распределение причин аварий на ГТС

Причина разрушения	Доля, %
Недостаточная пропускная способность	35
Разрушение основания	25
Разрушение конструкций	12
Разрушение и оползание откосов	11
Высокое граничное давление (в намывных плотинах)	5
Военные действия	3
Неравномерное оседание	3
Неправильная эксплуатация	3
Дефекты материалов	2
Землетрясение	1

В настоящее время в мире не существует утвержденных нормативно-технических документов по оценке риска аварий ГТС, однако имеется ряд ведомственных методик, позволяющих оценить риск аварии на этих сооружениях.

СИГБ рекомендует оценивать риск в виде математического ожидания последствий наступления опасного события (как произведение вероятности этого события на математическое ожидание величины его последствий) или в виде сценария вероятностей событий и их последствий. Таким образом, риск зависит от вероятности аварии плотины и ее последствий и представляет собой большую величину, даже если эта вероятность очень мала⁶.

В настоящее время в странах, где имеются ГТС, в целях контроля за их безопасностью применяются три уровня оценок приемлемости риска⁷:

- 1) в первой группе стран (Канада, Норвегия, Нидерланды и др.) осуществляется регламентный анализ риска аварий и разработаны критерии его проведения;
- 2) во второй группе (Швеция, Испания и др.) анализ риска рекомендован, но применяется только в критических ситуациях;
- 3) в третьей группе стран (Российская Федерация, Франция, США, Англия и др.) анализ риска используют только в промышленности, а применение его в условиях ГТС проводится в исключительных случаях.

Начиная с 2000 г. Российская Федерация начала активно изучать проблемы анализа и оценки риска аварий на ГТС. Так, в 2000 г. акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (ОАО «НИИ ВОДГЕО») разработало Методические указания по проведению анализа риска аварий ГТС, где были определены методические принципы, термины и определения анализа риска, а также методы

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 2.

анализа риска аварий ГТС разных типов и классов. В 2005 г. данное издание было переработано⁸. Далее в 2001 и 2004 гг. ОАО «Научно-испытательный институт эргатических систем» (ФГУП РосНИИВХ) разработало Методику определения критериев безопасности гидротехнических сооружений и Методику оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений^{9, 10}, которые определяют основные понятия, регламентируют процедуру и последовательность действий при выборе контролируемых и диагностических показателей состояния ГТС в составе проекта, а также на стадии их эксплуатации, помогают осуществлять определение критериальных значений показателей на уровне качественного и количественного анализа факторов, оказывающих значительное влияние на безопасность сооружения (детерминированный подход), разработку прогнозных математических моделей без оценки риска.

В своде правил¹¹ приводятся допустимые значения вероятностей возникновения аварий на напорных ГТС I–IV классов (табл. 4).

Таблица 4. – Допускаемые значения вероятностей возникновения аварий на напорных ГТС, 1/год

№ п/п	Класс сооружения	Вероятность возникновения аварий
1	I	5×10^{-5}
2	II	5×10^{-4}
3	III	$2,5 \times 10^{-3}$
4	IV	5×10^{-3}

В работе [3] приведены данные ранжирования гидротехнических сооружений по степени опасности (табл. 5).

Таблица 5. – Расчетные коэффициенты рисков аварий для различных уровней безопасности ГТС

№ п/п	Уровень безопасности	Риск аварии			
		I класс	II класс	III класс	IV класс
1	Нормальный	5×10^{-5}	5×10^{-4}	4×10^{-3}	$5-6 \times 10^{-3}$
2	Пониженный	$6,4 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$4,87 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
3	Неудовлетворительный	$1,18 \times 10^{-3}$	$3,16 \times 10^{-3}$	$7,09 \times 10^{-3}$	$2,75 \times 10^{-2}$
4	Опасный	$3,4 \times 10^{-3}$	$9,2 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-2}$	8×10^{-2}

Основной проблемой при оценке риска аварий на ГТС является правильность определения сценария развития аварийной ситуации. Следует учитывать и тот факт, что сам риск носит условный характер и определяется объективными и субъективными факторами. Правильность оценки риска аварии зависит не только от квалификации экспертов, а также от их умения работать с данными факторами. Оценка риска основывается на результатах контроля и анализа факторов безопасности (количественные и качественные характеристики состояния сооружения, природных воздействий и ожидаемого ущерба от аварии или разрушения ГТС), наиболее существенных для данного сооружения, и условий его эксплуатации.

Задача качественного анализа направлена на идентификацию возможных видов рисков, стоимостной оценки всех возможных последствий, выработке предложений или мероприятий по минимизации и компенсации данных последствий. Их результаты служат основой и фундаментом для осуществления количественного анализа.

Количественный анализ заключается в возможности численно определить экономический ущерб отдельных видов риска или всего риска в целом. По сути, это факторы или их совокупность (показатели), в зависимости от величин, на основании которых строится градация по степеням опасности, уязвимости, риска.

⁸ Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений. – 2-е изд. / Под ред. Е.Н. Беллендира, Н.Я. Никитиной. – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005. – 115 с.

⁹ Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. – М.: 2001. – 24 с.

¹⁰ Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений. Стандарт предприятия / Под ред. И.Н. Иващенко. – М.: ОАО «НИИЭС», 2004. – 24 с.

¹¹ См. сноску 10.

В работе [4] было проведено сравнение возможных рисков по трем методикам [2–4]. В ходе анализа было установлено, что по [2] оценка риска проводилась методом экспертных оценок и сводилась к получению нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу.

Опасность аварии ГТС определялась по следующим показателям:

- 1) возможность превышения природных нагрузок и воздействий на сооружения;
- 2) соответствие проектных решений современным требованиям, изложенным в нормативно-технической документации;
- 3) соответствие проекту конструкции сооружения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания;
- 4) возможные последствия и ущерб при аварии ГТС.

В таблице 6 приведены данные результатов расчета риска возникновения аварий грунтовых плотин на основании экспертных оценок вследствие потери статической устойчивости (уязвимости) [5]. Степень уязвимости ГТС определялась их восприимчивостью к воздействию следующих факторов опасности:

- 1) состояние сооружения (инструментальные наблюдения и визуальный контроль);
- 2) метеорологические условия в зоне размещения ГТС (по данным мониторинга);
- 3) организация эксплуатации ГТС (соблюдение требований безопасной эксплуатации);
- 4) готовность объекта к ликвидации чрезвычайной ситуации.

Таблица 6. – Результаты расчета риска возникновения аварий грунтовых плотин вследствие потери статической устойчивости различными методами

Номер плотины	Риск аварии P_1 по методике R. Fell, 1/год	Риск аварии P_2 по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО», 1/год	Риск аварии P_3 по методике ФГУП РосНИИВХ, 1/год	Риск аварии P_4 по методике ОАО «НИИ ВОДГЕО», 1/год (с учетом состояния водосбросного сооружения)
1	$4,7 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-3}$	17×10^{-2}
2	$2,7 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-2}$
3	$2,9 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$9,3 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-2}$
4	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$7,7 \times 10^{-3}$

Оценка вероятности отказа грунтовых плотин по методу R. Fell [5] осуществляется по среднегодовым отказам грунтовых плотин и дамб при нормальных условиях их эксплуатации по следующим причинам:

- 1) потеря устойчивости откосов;
- 2) нарушение фильтрационной прочности тела плотины;
- 3) нарушение фильтрационной прочности основания плотины.

При этом данная оценка по указанным причинам включала следующие этапы:

- 1) определение категории грунтовой плотины или дамбы;
- 2) выбор коэффициентов, влияющих на вероятность отказов грунтовой плотины по внутренним причинам;
- 3) вычисление коэффициентов риска, характеризующих соответственно устойчивость откосов плотины или дамбы, фильтрационную прочность грунтов тела сооружения и его основания (выполнялась экспертной группой с учетом условий размещения и эксплуатации, класса и категории исследуемого сооружения);
- 4) определение вероятности отказов грунтовой плотины за время ее срока службы по графикам связи коэффициентов риска с вероятностью отказа;
- 5) определение среднегодовой вероятности отказа, допустимой для среднего срока службы грунтовых плотин;
- 6) корректировка результатов с учетом качества мониторинга, уровня эксплуатации плотины, признаков нарушения устойчивости откосов или развивающихся фильтрационных деформаций.

Вероятности отказа грунтовой плотины или дамбы в результате нарушения устойчивости откосов сооружения, нарушения фильтрационной прочности грунтов тела плотины или дамбы и их оснований определялась по графику связи коэффициентов риска с вероятностью отказа.

Среднегодовые значения вероятности отказа грунтовой плотины или дамбы по внутренним причинам определялись путем деления величин определенных коэффициентов на 30 лет (средний срок эксплуатации плотин – объектов СИГБ).

Оценка риска аварии ГТС по методике ФГУП РосНИИВХ [3] производится на основе анализа дерева событий, в котором в качестве основных причин возникновения аварий на грунтовых плотинах рассматривались четыре независимых фактора:

- 1) перелив воды через гребень;
- 2) образование оползня;
- 3) суффозионные процессы;
- 4) ошибки при проектировании и эксплуатации гидроузла.

На основании сопоставительного анализа по каждому из основных факторов дерева событий выбираются два-три сценария. Для каждого фактора возникновения аварии определяется значение риска. Суммарный же риск аварийной опасности ГТС определяется как сумма рисков, определяемых независимыми факторами.

Результаты оценок, представленные в таблице 6, указывают на тот факт, что количественные оценки риска, полученные по разным методикам, имеют значительное расхождение (до двух порядков).

Заключение

Существующие методики оценки риска возникновения ЧС на ГТС сложны, громоздки и трудоемки из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных. Так, анализ работы [2] показал, что:

- 1) некоторые показатели уровней оценки уязвимостей и их отличительные признаки не имеют точной градации (дифференциации), а описывают возможность возникновения того или иного процесса, т.е. носят качественный анализ;
- 2) с учетом значительной разбежки в относительной погрешности расчетов риска возникновения аварий на ГТС возникает необходимость в проведении дополнительных исследований и определении показателей опасности, уязвимости и т.д. (возможность обрушения береговых склонов, сейсмическое воздействие, движение наносов и т.д.);
- 3) определение таких численных характеристик, как коэффициент значимости показателя опасности, затруднителен, и определение его значимости, т.е. численной характеристики, будет зависеть от степени квалификации эксперта. При этом значение данного коэффициента одинаково для трех показателей опасностей и их кодов, в связи с чем возникает вопрос о его физической нагрузке при определении коэффициента опасности.

Таким образом, для оценки риска возникновения гидродинамической аварии на ГТС требуется разработка методики (методических рекомендаций), позволяющих проводить анализ для разных типов и классов грунтовых и бетонных плотин, работающих в различных условиях и имеющих различный уровень и степень повреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малик, Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности / Л.К. Малик. – М.: Наука, 2005. – 354 с.
2. Розанов, Н.С. Аварии и повреждения плотин / Н.С. Розанов [и др.]; под общ. ред. А.А. Борового. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 126 с.
3. Зотеев, В.Г. Методические принципы оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малого объема / В.Г. Зотеев [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 10. – С. 41–48.

4. Волков, В.И. Анализ результатов оценки риска аварий гидротехнических сооружений, полученных по различным методикам / В.И. Волков, Е.В. Добровольский // Природообустройство. – 2015. – № 2. – С. 39–44.
5. Fell, R. Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams under Normal Operating Conditions // Repair and Upgrading of Dams: Symposium in Stockholm. – Stockholm, 1996. – P. 567–576.

**Определение вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций
на гидротехнических сооружениях**

Determination of emergencies probability at hydraulic structures

Кобяк Валерий Викторович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: valkobkii@gmail.com

Valery V. Kobyak

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Chair of
Emergency Elimination, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: valkobkii@gmail.com

Миканович Дмитрий Станиславович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра управления
защитой от чрезвычайных ситуаций, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

Dmitry S. Mikanovich

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Management,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

Журов Марк Михайлович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра процессов
горения и взрыва, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: Zhurmark@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5228-7371

Mark M. Zhurov

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Combustion and Explosion Processes,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: Zhurmark@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5228-7371

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.343>

DETERMINATION OF EMERGENCIES PROBABILITY AT HYDRAULIC STRUCTURES

Kobyak V.V., Mikanovich D.S., Zhurov M.M.

Purpose. Analyze the methods for determining the risk of hydrodynamic accidents on hydraulic structures of various types (reservoirs, sludge storage, technical reservoirs, etc.). Substantiate the main directions for improving the system of ensuring the safety and reliability of hydraulic structures.

Methods. The method of theoretical analysis of literary sources was applied in assessing the regulatory and legal framework of the Central Asian countries in the field of ensuring the safety of hydraulic structures of various types. The processing of the obtained results is carried out using the method of estimation and theoretical generalization of the data obtained.

Findings. It has been established that the existing methods for assessing the risk of emergencies at hydraulic structures of various types (reservoirs, sludge storage, technical reservoirs, etc.) are complex, cumbersome and laborious to use due to the lack, inaccuracy and uncertainty of the initial data. In this regard, it is required to develop a methodology for assessing the risk of emergencies at hydraulic structures, taking into account their design features.

Application field of research. The research results can be used for a comprehensive assessment of the state of hydraulic structures of the Ministry of Natural Resources, as well as the Ministry of Emergency Situations in the development of medium and long-term forecasts of emergencies.

Keywords: safety of hydraulic structures, risk of emergencies, dam, dike, monitoring, safety criteria, hydrodynamic accident.

(The date of submitting: March 9, 2021)

REFERENCES

1. Malik L.K. *Fakторы riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Risk factors of damage to hydraulic structures. Security concerns]. Moscow: Nauka, 2005. 354 p. (rus)
2. Rozanov N.S., Tsarev A.I., Mikhaylov L.P., Sokolov I.B. *Avarii i povrezhdeniya plotin* [Accident and damage of dams]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 126 p. (rus)
3. Zoteev V.G., Shakhov I.S., Morozov M.G., Prikhod'ko M.A. Methodological principles for risk assessing at small-capacity reservoirs. *Power Technology and Engineering*, 2003. No. 5. Pp. 290–296. DOI: 10.1023/B:HYCO.0000009795.94800.70.
4. Volkov V.I., Dobrovolskiy E.V. Analiz rezul'tatov otsenki riska avariyn gidrotekhnicheskikh sooruzheniy, poluchennykh po razlichnym metodikam [Analysis of the results of the assessment of the risk of accidents of hydraulic structures obtained by various methods]. *Prirodoobustroystvo*, 2015. No. 2. Pp. 39–44. (rus)
5. Fell R. Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams under Normal Operating Conditions: *Repair and Upgrading of Dams: Symposium in Stockholm*. Stockholm, 1996. Pp. 567–576.