

УДК 502/504: 55; 624.131

ИНДЕКСНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА РИСКОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ НА ГОРНОЙ ТЕРРИТОРИИ: ПРИНЦИПЫ И ПРОЦЕДУРЫ

Алёшин Ю. Г.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Рассмотрены принципы и процедуры метода анализа риска хвостохранилища и предложен вариант расчёта индексов: гибели людей, экономического ущерба в дальней и ближней зонах поражения, глобального воздействия.

Ключевые слова: Анализ риска, индексный метод, зона поражения.

ТООЛОРДУН КУЙРУКТАРЫ ҮЧҮН КОРКУНУЧТУУЛУККА ИНДЕКСТИ ТАЛ- ДОО МЕТОДИ: ПРИНЦИПТЕР ЖАНА ПРОЦЕДУРАЛАР

Алешин Ю. Г.

КР УИАнын Геомеханика жана жер казынасын өздөштүрүү институту

Калдыктарды сактоочу жайлардын тобокелдигин талдоо ыкмасынын принциптери жана жол-жоболору каралып, индекстерди эсептөөнүн варианты сунушталган: адамдардын өлүмү, кыйроонун алыскы жана жакынкы зоналарында экономикалык зыян, глобалдык таасир.

Баштапкы сөздөр: Тобокелдиктерди талдоо, индекстик ыкма, жабыркаган аймак.

INDEX METHOD FOR ANALYZING THE RISKS OF TAILINGS DAM IN A MOUNTAINOUS AREA: PRINCIPLES AND PROCEDURES

Aleshin Yu. G.

Institute of Geomechanics and Development of Subsoil of the NAS KR

The principles and procedures of the method for tailings dam risk analyzing described, and calculation the indexes of loss of life and property in the far and near affected areas and the overall impact proposed.

Keywords: Risk analysis, index method, affected area.

Оценка безопасности заложения накопителей горнопромышленных отходов (ГПО) и их длительного хранения должна рассматриваться как отправная точка для анализа альтернативных решений восстановления старых объектов, в том числе как альтернатива полного бездействия. Выбор же предпочтительного варианта реабилитации является сложной задачей принятия решений, которая должна учитывать целый ряд факторов помимо радиационной и химической токсичности отходов. Например, в рамках экономических критериев необходим анализ прямых затрат на реабилитацию (оплата рабочей силы, расходных материалов эксплуатации оборудования и транспорта, создание дополнительных коммуникаций, как правило, временных, расходы на управление и т. д.). Помимо этого следует рассматривать социальные последствия: прямое воздействие на здоровье людей, удовлетворённость сообщества элементами действия или бездействия по реабилитации и ряд других факторов.

Вообще существует три основных критерия высшего / первого уровня для соответствующего управления любым объектом с утилизированными ГПО (рис. 1): воздействие на окружающую среду (ВОС), социальное влияние (СВ) и экономическое воздействие (ЭВ). ВОС обусловлено выбросом загрязняющих веществ из накопителей ГПО в атмосферу, подземные и поверхностные воды питьевого и хозяйственного назначения, которые могут нарушать функционирование водной биоты, жизнедеятельность местной флоры и фауны, сказываясь в конечном итоге на человеке. Как радиоактивные, так и токсичные химические загрязнения учитываются и измеряются в единицах дозы облучения или степени накопления химических элементов (их концентрации) в массе реципиентов живой и неживой природы. Дозы и воздействия, полученные из оценок безопасности, принимаются в качестве эталонных значений для альтернативы бездействия на площадке заложения хранилища ГПО, а варианты реабилитации должны оцениваться по отношению к изменениям этих доз и воздействий.

СВ оценивается по четырём направлениям. Здоровье и безопасность человека связывается как с физическим его поражением в случае аварии, так и с радиологическим или / и токсикологическим (химико-биологическим) воздействием. При этом радиологическое воздействие включает как внешнее (преимущественно гамма-облучение) так и внутреннее облучение, полученное в результате дыхания радиоактивных газов и аэрозолей, а также при заглатывании воды и пищи, загрязнённой радиоактивными компонентами. Токсикологическое / химическое воздействие осуществляется преимущественно за счёт процессов дыхания и заглатывания. При этом, рассматривая варианты реабилитации, нельзя забывать о дополнительных дозах облучения и / или химического воздействия, полученных как персоналом, занятым реабилитацией объектов, так и местным населением за весь период работ.

Удовлетворённость сообщества может быть выражена в том, как каждый его член, проживающий в зоне влияния накопителя ГПО, воспринимает предложенные альтернативы реабилитации: как самого хода её проведения, так и ожидаемых результатов. Оценка этих факторов воздействия может производиться по субъективной шкале.

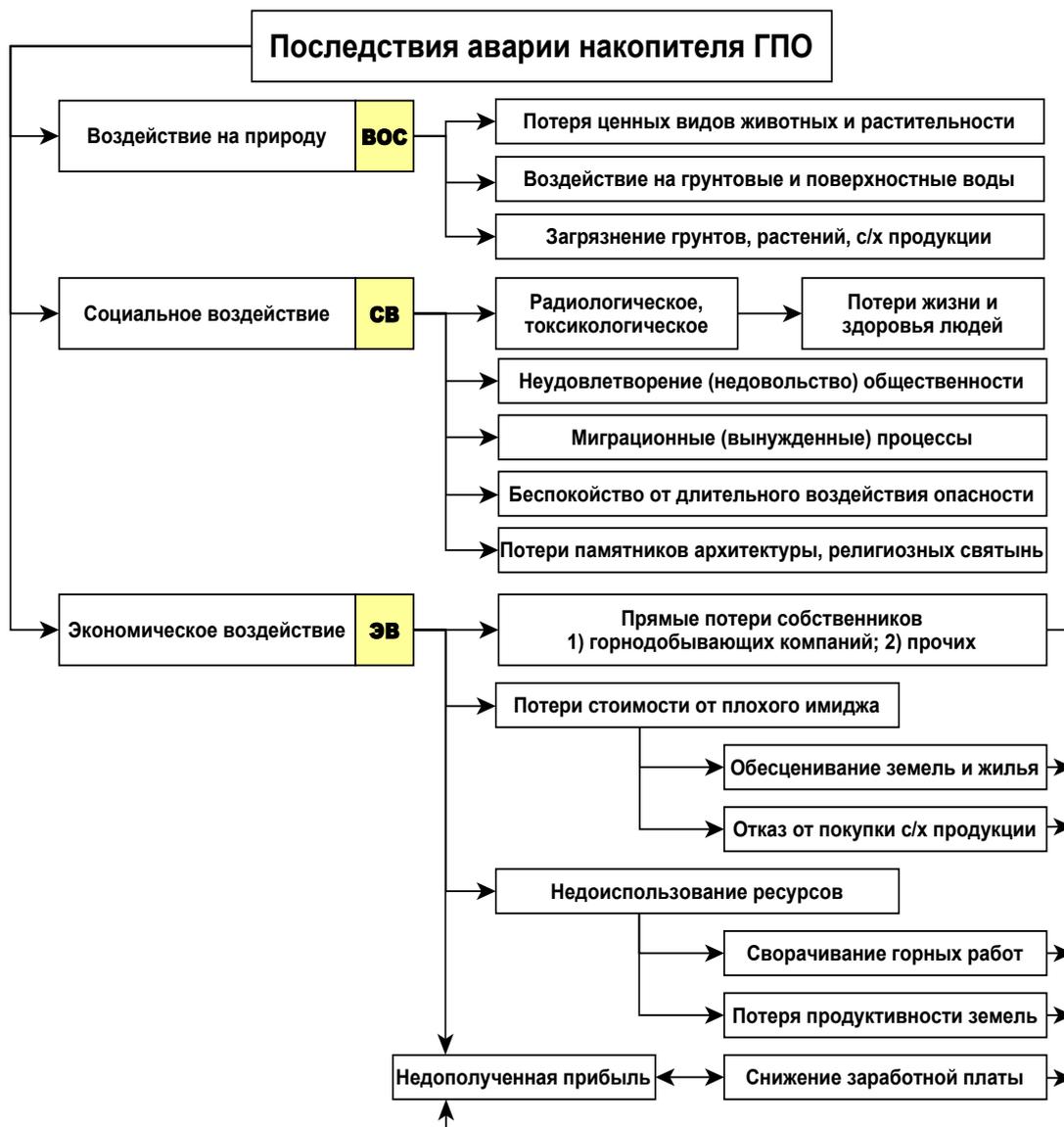


Рис. 1. Классификация воздействий при аварии накопителей ГПО

В группе факторов ЭВ прямые затраты относятся к технике и технологии реализации проекта по реабилитации; это денежный атрибут. Стоимость потерь или косвенные затраты, связанные с реализацией альтернативных вариантов реабилитации объектов, относятся к общественному восприятию, например, нежеланию покупать товары / продукты из районов размещения хранилищ ГПО, даже если они не загрязнены или падению туристического бизнеса, обесценивание земель и жилой недвижимости и т. д. Положительным фактором может явиться создание рабочих мест во время и после реализации проекта реабилитации, т. е. повышение занятости местного населения и дохода людей, а также прибыль, которая может быть

получена от реализации продуктов захоронения утилизированных отходов или продуктов их переработки. Эти показатели также могут быть выражены в денежных единицах.

В свете всего вышесказанного очевидна главная проблема оценки безопасности на территории размещения накопителя ГПО, а также выбора варианта его реабилитации: каким образом объединить большую группу разнородных показателей воздействий в виде алгоритма, матрицы или глобального показателя, однозначно определяющего как саму безопасность, так и создающего метрическую базу для сравнения между собой различных вариантов реабилитации, в том числе определяя её приоритеты на территории заложения некоторого множества подобных объектов. Принятие решений или оценка последствий аварий накопителей ГПО при таком комплексе разнородных факторов последствий представляет трудную и актуальную задачу специальных исследований в рамках логико-математического многокритериального анализа принятия решений (МКПР) в условиях неопределённости, в данном случае связанных изначально с механизмами и параметрами физико-механического и гидрологического процесса аварии. Структурирование и упрощение решений [1] чаще всего осуществляют исходя из вероятностей возможных факторов последствий и предпочтений при их отборе. Существующая априорная информация, собранные на месте данные, модели, профессиональные суждения используются для количественной оценки вероятностей последствий, а теория полезности – для количественной оценки предпочтений.

Одним из методов, широко применяемых в системах управления промышленной безопасностью, является использование анализа рисков, для которого применяются аналитические, итеративные, описательные и качественные методы, такие как FMEA ("Анализ характера и последствий отказа" – "Failure Modes and Effects Analysis"), для выявления и анализа потенциальных разрушений, исходя из определённого режима отказа, его при-

чин и последствий, а также средств обнаружения и предотвращения режимов отказа и смягчения их последствий. Этот метод был использован в Бразилии для оценки безопасности состояния хвостохранилищ, а также предложен для анализа безопасности гидротехнических объектов в России [2,3,4,5]. В то же время в Европе был разработан специальный инструмент для анализа рисков дамб – полуколичественной метод LCI ("Анализ по диаграммам расположения, причинам и индикаторам отказов" – "Analysis by Diagrams Location, Cause and Failure Indicators") [6], который применялся в Великобритании под названием "Управление рисками для водохранилищ в Великобритании" и в Европе, но не для хвостохранилищ. Недавно была предложена версия LCI-MOD-REJ – адаптация метода LCI, которая была применена к одному из бразильских хвостохранилищ для прямого анализа рисков этого типа сооружений.

Ещё недавно (25–30 лет назад) методики оценки рисков, разработанные для использования в других отраслях промышленности и науки, не применялись к дамбам и хранилищам ГПО на регулярной основе. Согласно A. Hughes et al. [6] этот факт может объясняться следующими причинами: недостаточность данных, уникальный характер каждой дамбы, сложные взаимодействия с окружающей природной средой, вмещающим горным массивом, связанные с поведением хвостохранилищ и материала "хвостов", неправильное восприятие незначительного риска разрушения дамбы, обеспокоенность по поводу стоимости оценки риска, скептицизмом, трудностями в понимании или применении результатов, полученных при любой форме оценки риска и, наконец, отсутствием знаний о методах оценки риска со стороны различных специалистов, связанных с утилизацией горнопромышленных отходов.

Метод LCI был разработан для оценки индивидуальной опасности, уязвимости и приобретённых знаний об этих сооружениях на основе анализа их характеристик в индексных показателях. В выполненной нами ра-

боте мы попытались адаптировать этот метод применительно к хвостохранилищам Кыргызстана, как находящихся в эксплуатации, так и в законсервированном состоянии в зоне развития селевых, паводковых и оползневых процессов, что существенно увеличивает риски их разрушения.

A. Hughes et al. [6] подготовили серию диаграмм местоположения, причин и индикаторов (LCI) на основе известных видов разрушений различных типов дамб, статистических данных и инженерных оценок существующих дамб при помощи метода "Анализа характера, последствий и важности отказов" – метода FMECA. Каждый анализ диаграммы LCI выполняется на основе характеристик плотины, таких как: тип (бетонная или насыпная), высота (менее 15, 15–30, более 30 м) и возраст (до 1840, между 1840 и 1960, после 1960 года). Следует заметить, что метод FMECA дополняет FMEA и представляет собой системный подход для анализа того, как система может выйти из строя (режим отказа), для определения последствий, связанных с каждым режимом отказа, и для оценки вероятности возникновения отказа и степени его влияния на работу системы через индекс критичности (насколько критичным будет этот тип отказа для работы системы).

Для характеристики причин и показателей, как отмечали A. Hughes et al., использовались три категории баллов (баллы в каждой – от 1 до 5):

- 1) эффекты или последствия в системе (Cons.) для отражения того, как разрушение элемента напрямую связано с полным (или частичным) разрушением дамбы;
- 2) вероятность (Like.), соответствующая вероятности разрушения элемента;
- 3) степень уверенности (Conf.) аналитика в последствиях и его вероятностных оценках для учёта неопределённостей в изученности дамбы или её компонентов; этот фактор позволяет учитывать меру неопределённости.

В ходе этого процесса последствия в нижнем бьефе оцениваются с помощью индекса глобального воздействия (*GII*), а произведение баллов по каждой категории (Cons., Like., Conf.) даёт индекс критичности для каждого

набора причин или показатели проблем, связанные с элементами дамбы. Произведение индексов $G//$ и индекса критичности даёт оценку (балл) риска.

Результатом является диаграмма "Местоположение–причина–индикатор" (LCI) указывающие проблемные области, список критичности, и оценки (баллы) рисков, связанных с причинами конкретных проблем и индикаторами, позволяя расставить приоритеты ресурсов для одной или нескольких площадок. Этапы этого метода:

Этап 1: Оценка воздействий, которая включает: сбор информации, осмотр объекта, прогноз выброса и потенциального уровня паводковых потоков в результате разрушения дамбы, оценку и подсчёт числа баллов конкретных последствий от затопления и подсчёт баллов.

Этап 2: Расчёт индекса глобального воздействия путём сокращения различных показателей воздействия до одного значения.

Этап 3: Разработка и применение диаграммы LCI с учётом компонентов дамбы и их вклада в возможное разрушение. Рассматривается разрушение дамбы по разным причинам и с разными показателями. Балл критичности рассматривается для каждой причины / показателя каждого элемента, учитываемого в общей безопасности дамбы.

На первом этапе информация собирается на протяжении 30 км ниже дамбы, включая основные характеристики заселённости, наличие сооружений и объектов инфраструктуры, а также приходные ресурсы. Рекомендуется провести инспекционный осмотр ближней части долины на протяжении первых 5 км от дамбы.

Выявление последствий включает оценку выброса "хвостов" через конкретную секцию дамбы, времени прорыва и уровней, которых достигает паводковая волна в заранее определённых участках долины. Для расчёта гидрографов вдоль долины используются численные модели прорыва дамбы или упрощённые методы, как это показали A. Hughes et al. [6]. После оценки долины и уровня воды ниже по течению, на который влияет паводковая волна, приступают к реализации Этапа 2, в ходе которого оценивают

индекс глобального воздействия (*GII*) путём взвешенной комбинации потенциальной гибели людей (*PLL*) и экономического ущерба (*EL*) на ближайшей части долины (первые 5 км) и на остальной части долины (до 30 км).

Для расчёта *PLL* число подвергающихся опасности людей (*PAR*) рассчитывается с учётом типов занятий на земле, т. е. жилой недвижимости, нежилой недвижимости, транспортной инфраструктуры, мест отдыха и развлечений, потенциального затронутых затоплением, с учётом оценок, представленных в таблице 1. Формально *PLL* рассчитывается по следующим уравнениям:

$$PLL = 0,5 PAR \text{ (в ближней зоне долины)} \quad (2.3)$$

$$PLL = (PAR)^{0,6} \text{ (в дальней зоне долины)} \quad (2.4)$$

Числовое значение для *EL* получается из взвешенной суммы баллов, связанных с потерями в ближней и дальней частях долины, при этом используются следующие весовые коэффициенты: 0,15 – для жилой недвижимости; 0,15 – для нежилой недвижимости; 0,10 – для объектов транспортной инфраструктуры; 0,05 – для рекреационных объектов; 0,25 – для промышленных площадок; 0,25 – для инженерных сооружений; 0,05 – для сельскохозяйственных регионов и природной среды.

После этого *GII* определяется уравнением

$$GII = 100 (EL_{<5 \text{ км}}) + (PLL_{<5 \text{ км}}) + 30 (EL_{5-30 \text{ км}}) + PLL_{5-30 \text{ км}} \quad (2.5)$$

После расчёта *GII* на следующем Этапе 3 проводится классификация причин и последствий с применением диаграмм LCI для оценки и классификации индексов ординации, достоверности, критичности и риска.

Причины и индикаторы аварий классифицируются по шкале от 1 до 5 с использованием выше описанных трёх атрибутов:

- (1) – последствия на дамбе (Cons. 1 – низкие, 5 – высокие);
- (2) – вероятность (Like. 1 – низкая, 5 – высокая);

(3) – степень доверия (Conf. 5 – низкая; 1 – высокая) к информации о состоянии объекта / элемента объекта.

Согласно Hughes [6], Caldeira [7], Pimenta [8,9] после классификации атрибутов можно рассчитать четыре индекса для каждого набора "Местоположение– причина–индикатор":

(1) – Индекс ординации (Ind.Ord.), который определяется произведением присвоенных рейтингов "Последствия" и "Вероятность";

(2) – Индекс доверия (Ind.Conf.), равный показателю доверия; чем он выше, тем более сомнительна информации; о состоянии и качестве объекта, тем более она неопределённая;

(3) – Индекс критичности (Ind.Crit.), определяемый произведением рейтингов присвоенных "Последствиям", "Вероятности" и "Доверию";

(4) – Индекс риска (Ind.Risk.), определяемый произведением индекса критичности и индекса глобального воздействия.

Адаптивная версия метода LCI – версия (LCI-MOD-Tail) предлагается нами для того, чтобы приспособить вышеупомянутую структуру, разработанную специально для дамб вообще любых гидротехнических сооружений (первоначально – для водохранилищ), к более конкретный области, чтобы сосредоточиться на оценке риска хвостохранилищ, включив этап "накопление хвостов" в общий анализ. Основная цель такой адаптивной версии заключается в выявлении структурных элементов, которые в наибольшей степени способствуют полному разрушению дамб хранилищ.

Pimenta V.M.L. [8] не рекомендует переходить ко второму этапу процедуры, когда индекс GII ниже 175, и поэтому нет необходимости оценивать индекс ординации (Ind.Ord.), индекс критичности (Ind. Crit.), индекс доверия (Ind. Conf.) и индекс риска (Ind. Risk). Однако, основываясь на более консервативном подходе в версии LCI-MOD-Tail, следует оценивать всегда виды аварий и уровни риска. Хвостохранилища не всегда эффективно контролируются в процессе строительства, после вывода из эксплуатации и консервирования, тем более в законсервированном состоянии. Сами хвосты, в

свою очередь, имеют характеристики, изменяющиеся со временем, что делает контроль качества конструкции ещё более необходимым. Поскольку на практике пока нет систематического контроля этих сооружений, особенно в малых и средних горнодобывающих компаниях, то полезно всегда применять предлагаемую версию LCI-MOD-Tail на протяжении всех трёх вышеупомянутых этапов. В рассмотренных диаграммах в элемент "Местоположение" с его подразделами "Тело дамбы, основания и опоры" и "Водосброс и его компоненты" как в оригинальном методе LCI необходимо добавлять элемент "Пруд хвостохранилища", а в законсервированном объекте – "Чаша хвостохранилища".

Таблица 1. Экономический ущерб (*EL*) и люди, подвергающиеся опасности (*PAR*) по A. Higeys et al. [42]

Воздействие 1 – Жилая недвижимость			
Затопленные объекты	Количество затопленных объектов	Баллы	<i>PAR</i>
Нет			
Минимальное число	0	0	0
Заметное число	от 1 до 15	1	30
Значительное число	от 16 до 50	2	100
Крупное затопление	от 51 до 250	3	500
	>250	4	2-кратная оценка
Воздействие 2 – Нежилые объекты			
Разрушения	Число поражаемых людей	Баллы	<i>PAR</i>
Нет	0	0	0
Минимальные	от 1 до 150	1	150
Заметные	от 151 до 500	2	500
Значительные	от 501 до 1000	3	1000
Большие	>1000	4	Оценка исследователей
Воздействие 3 – Транспортная инфраструктура			
Разрушения	Инфраструктурные поражения	Баллы	<i>PAR</i>
Нет	Нет	0	0
Минимальные	Только второстепенные	1	25
Заметные	Большие региональные	2	50
Значительные	Большие национальные	3	100
Большие	Большие международные	4	Оценка исследователей
Воздействие 4 – Места отдыха, развлечений			
Разрушения	Число пострадавших	Баллы	<i>PAR</i>
Нет	0	0	0

Минимальные	от 1 до 10	1	10
Заметные	от 11 до 50	2	50
Значительные	от 51 до 100	3	100
Большие	>100	4	Оценка исследователей

Воздействие 5 – Промышленные площадки			
Разрушения	Тип промышленной площадки	Баллы	PAR
Нет	Нет	0	0
Минимальные	Лёгкая промышленность	1	20
Заметные	Объекты здравоохранения	2	50
Значительные	Тяжёлая промышленность	3	100
Большие	Ядерная / нефтехимическая	4	Оценка исследователей

Воздействие 6 – Объекты обслуживания, инженерные коммуникации			
Разрушения	Влияние на коммунальные службы	Баллы	PAR
Нет	Нет	0	0
Минимальные	Локальные потери распределения	1	5
Заметные	Локальные потери снабжения	2	10
Значительные	Региональные потери распределения / снабжения	3	20
Большие	Значительные последствия на национальном уровне	4	Оценка исследователей

Воздействие 7 – Сельскохозяйственные угодья / места обитания			
Определение	Тип площадки	Баллы	PAR
Нет	Неиспользуемые	0	0
Минимальное	Пастбища, луга	1	2
Заметное	Развитое с/х производство	2	10
Значительное	Интенсивное использование земель	3	30
Большое	Потери международные, региональные, трансграничные	4	100

В следующей работе автора будет продемонстрирована техника вычислений и проведён анализ результатов оценки риска заложения одного из хвостохранилищ на берегу горной реки в Майлуу-Суу с использованием рассмотренной выше методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Belton, V. Multiple criteria decision analysis – practically the only way to choose // L.C. Hendry and R.W. Englese (eds.), Operational Research Tutorial, Birmingham: Operational Research Society. – 1990. – с. 53–101

2. Espósito T., Palmier L. R. Application of risk analysis methods on tailings dams //Soils and Rocks, São Paulo. – 2013. – Т. 36. – №. 1. – С. 97-117.
3. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений СТП ВНИИГ 210.02.НТ-04. СПб. Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2005. – 100 с.
4. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов / Постановление Госгортехнадзора РФ № 30 от 10.07.2001. М.: Госгортехнадзор РФ, 2001.
5. Schafer, H.L.; Beier, N.A.;Macciotta, R. Applying a Generalized FMEA Framework to an Oil Sands Tailings Dam Closure Plan in Alberta, Canada. Minerals 2022, 12, 293. doi: 10.3390/min12030293
6. Hughes A. K., Hewlett H. W. M., Elliott C. Risk management for UK reservoirs //Proceedings of the biennial conference of the BDS held at the University of Bath on 14-17 June 2000. – Thomas Telford Publishing, 2000. – С. 148-158.
7. Caldeira L. Análise de Risco em Geotecnia. Aplicação a Barragens de Aterro //Programas de Investigação e de Pós-Graduação na Área Científica de Mecânica de Solos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. – 2005. – Т. 248.
8. Pimenta Baptista M. L. Abordagens de riscos em barragens de aterro //Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa. – 2009.– Т. XXVI – 534 с.
9. Pimenta L., Caldeira L., Silva Gomes A. Análise de riscos da ensecadeira de Odelouca. Aplicação de uma metodologia simplificada com base em diagramas LCI //Seminário de Barragens Tecnologia, Segurança e Interacção com a Sociedade. – 2005. – Т. 4. – С. 609-627.