

УДК 626.134'212

**Максимов Дмитрий Анатольевич**  
научный сотрудник,  
Горный институт КНЦ РАН,  
184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 24  
e-mail: [maximoffda@gmail.com](mailto:maximoffda@gmail.com)

### ИНДИКАТОРЫ НАЛИЧИЯ В ТЕЛЕ НАСЫПНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

*Аннотация:*

Статья посвящена разработке системы индикаторов наличия локальных фильтрационных нарушений в теле насыпного гидротехнического сооружения (ГТС). Актуальность темы статьи обуславливается тем, что протечки, вызванные подобными нарушениями, являются причиной 31 % аварий на ГТС в мире.

Показан механизм формирования следов суффозионного выноса на поверхности полок и у основания сооружения. Обнаружение следов суффозионного выноса осложняется тем, что в большинстве случаев вынос происходит в основании сооружения и сопровождается перераспределением вынесенных частиц на значительной площади, оседании их на дне водоемов в нижнем бьефе или маскировке выносов скальными банкетам или пригрузами. В связи с этим обнаружение суффозионного выноса более вероятно на поверхности полок, на которых вынос происходит периодически в связи с сезонным изменением уровня и гидростатического давления вод.

Рассмотрен механизм формирования локальных оседаний поверхности сооружения, происходящих в результате суффозионного выноса частиц сооружения на участках локальных нарушений фильтрационной устойчивости.

Описаны сконцентрированные выходы фильтрующихся вод в основании сооружений или отдельных уступов, которые формируются в результате перераспределения фильтрующихся в теле ГТС вод, происходящего из-за локальных нарушений фильтрационной устойчивости.

Приведено описание механизма возникновения и примеры фонтанирования воды у основания ГТС. Фонтанирование воды является проявлением гидростатического давления оражаемого водного объекта, передаваемого к основанию ГТС через фильтрационные ходы.

Описан механизм возникновения локальных поднятий поверхности насыпного ГТС. Приведены примеры таких поднятий. Описаны сложности при обнаружении данного индикатора, например, связанные с тем, что на участке локального поднятия часто наблюдается последующее оседание поверхности полки, которое происходит в результате суффозионного выноса частиц сооружения или падения гидростатического и порового давления.

Полученные индикаторы позволяют разработать алгоритм обследования насыпного ГТС, направленного на поиск и обнаружение локальных нарушений фильтрационной устойчивости и фильтрационных ходов.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, фильтрационная устойчивость, нарушения, фильтрационные ходы, мониторинг, индикаторы, деформации, эрозия, гидростатическое давление

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.098

**Maksimov Dmitry A.**  
Research Worker,  
Mining Institute of KSC RAS,  
184209, Apatity, Fersman st., 24  
e-mail: [maximoffda@gmail.com](mailto:maximoffda@gmail.com)

### INDICATORS FOR THE PRESENCE OF LOCAL FILTRATION STABILITY DISTURBANCES IN THE MADE GROUND HYDROTECHNICAL FACILITY BODY

*Abstract:*

The article is devoted to the development of an indicator system for local filtration disturbances presence in a made ground hydrotechnical facility body. The relevance of the theme is determined by a fact that leakages caused by such disturbances result in 31% of accidents at ground hydrotechnical facilities in the world.

The formation mechanism of suffusion removal traces on the shelves' surface and at the foundation of a facility is shown. Detection of the suffusion removal traces is complicated by the fact that in most cases the removal occurs at the facility basis and is accompanied by redistribution of the removed particles over a considerable area, sedimentation on the basin bottom and tail-water or masking of the removals with rocky banquetts or cantledges. In this regard, the detection of suffusion removal is more likely on the shelves' surface, where the removal occurs periodically because of seasonal changes in the level and hydraulic pressure waters.

The study consider formation mechanism of local subsidence of a facility's surface resulting from suffusion removal of the facility's particles at sites of local disturbances of filtration stability.

The paper describes concentrated filtered water outflows at the facilities foundation or separate benches that are formed as a result of filtered water redistribution in a ground hydrotechnical facility body, resulting from local disturbances in filtration stability.

The paper illustrates an origin mechanism and examples of water flowing at the hydrotechnical facility foundation. The water flowing is a sign of the hydraulic pressure of an enclosed water reservoir, which is transmitted to the facility foundation through filtration paths.

The authors describe a mechanism of local uplifts of a ground hydrotechnical facility's surface and present examples of such uplifts. Difficulties in the detection of this indicator are described, which can be connected with the fact that in the area of a local uplift specialists often observe the subsequent subsidence of the shelf's surface, which occurs as a result of suffusion removal of facility's particles or the fall of hydraulic and pore pressure.

The received indicators allow to develop an inspection algorithm for a made ground hydrotechnical facility, intended on search and detection of local filtration stability disturbances and filtration paths.

**Key words:** hydrotechnical facilities, filtration stability, disturbances, filtration paths, monitoring, indicators, deformations, erosion, hydraulic pressure

### Введение

Фильтрационные процессы в теле насыпных ГТС зачастую происходят неравномерно, наблюдаются локальные нарушения фильтрационной устойчивости и фильтрационные ходы [1]. Данные нарушения приводят к формированию локальных протечек в теле сооружения, что не только приводит к потере воды из ограждаемого водного объекта, но и является причиной 31 % аварий на насыпных ГТС и локальных деформаций сооружений [2 – 5]. Данная проблема становится все более актуальной с возрастом сооружения [6]. В связи с этим идентификации локальных нарушений фильтрационной устойчивости необходимо уделять особое внимание. Однако современный комплекс мониторинга ГТС, регламентируемый нормативными актами, в который входят, как правило, геодезические, геологические и гидрографические работы, не направлен на поиск подобных нарушений [7 – 10]. В связи с этим актуальной является задача выявления индикаторов наличия в теле ГТС локальных нарушений фильтрационной устойчивости и фильтрационных ходов, чему посвящена данная статья.

#### *Следы суффозионного выноса материала сооружения*

Локальное нарушение фильтрационной устойчивости, формирование фильтрационного хода сопровождаются суффозионным выносом материала насыпного ГТС. В связи с этим следы суффозионного выноса являются индикатором наличия локального нарушения фильтрационной устойчивости.

Однако обнаружение следов суффозионного выноса материала обследуемого сооружения не всегда возможно, в силу того что поток, приводящий к выносу частиц, как правило, выходит на поверхность у основания сооружения в нижнем бьефе и распределяется по большой площади, формируя обширные прудки или соединяясь с естественными водными объектами. В результате этого вымытые частицы распространяются на обширных площадях, что не только делает сложным их обнаружение, но и практически невозможным определение местоположения фильтрационного хода, которым данные частицы были вымыты. Дополнительно осложняет задачу обнаружения следов суффозионного выноса у основания сооружения наличие скального пригруза или банкета, в которых могут оседать частицы, вымытые из тела ГТС, но при этом отсутствует возможность их обнаружения.

В связи с вышеописанными трудностями обнаружение следов суффозионного выноса частиц в основании сооружения маловероятно. Однако следы суффозионного выноса могут быть обнаружены на поверхностях полок сооружения. На рис. 1 представлены фотоснимки следов суффозионного выноса материала ограждающей дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия.



Рис. 1 – Следы суффозионного выноса материала насыпного ГТС

Возможность обнаружения следов суффозионного выноса на поверхностях полок связана с сезонным характером изменения уровня фильтрующейся в сооружении воды, а также с проявлением гидростатического давления. На рис. 2 представлен график изменения уровня воды в прудке, ограждаемом насыпными ГТС в течение 2017 г.

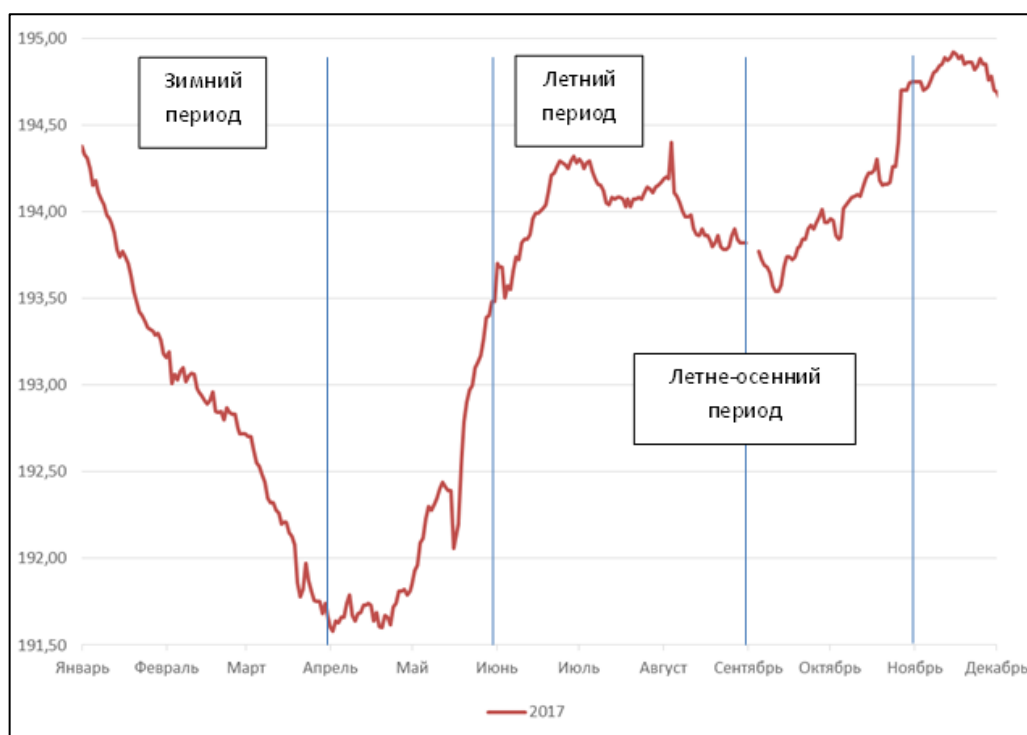


Рис. 2 – График уровня воды в прудке хвостохранилища

На рис. 2 четко видна сезонность, зависящая от осадков и температуры воздуха, уровня воды в прудке. Так, до конца апреля 2017 г. температура воздуха в районе рассматриваемого прудка держалась ниже нуля градусов по Цельсию. В соответствии с этим до конца мая 2017 г. длился период накопления зимних осадков без их таяния. Соответственно, минимальные значения уровня воды (зимняя межень) были зафиксированы в период с 5 по 25 апреля.

После 26 апреля средние температуры воздуха начали повышаться. Это привело к началу весеннего снеготаяния и повышению уровня вод до своих максимальных значений (половодье), наблюдавшихся в период с третьей декады июня до второй половины июля. Во время летнего периода наблюдался период понижения уровня воды (летняя межень), длившийся со второй половины июля до конца августа.

После прохождения периода половодья, в третьей декаде июля, уровень воды начал понижаться, пока не достиг своих минимальных значений в сентябре 2017 г. (летне-осенняя межень).

Повышение уровня воды в прудке в периоды половодья приводит к повышению уровня фильтрующихся вод в прудке, что приводит к повышению уровня депрессионной кривой в теле сооружения. При равномерной проектной фильтрационной устойчивости сооружения фильтрационные процессы в его теле происходят равномерно и не приводят к выходу фильтрующихся вод на поверхность ГТС.

Если в теле сооружения присутствуют локальные нарушения фильтрационной устойчивости, то они служат концентраторами фильтрующихся вод, а также каналом передачи гидростатического давления от ограждаемого прудка к основанию ГТС. Во время сезонного повышения уровня вод в прудке происходит увеличение гидростатического давления со стороны фильтрационного хода. Если фильтрационный ход имеет меньшую пропускную способность или она ограничена методами повышения фильтрационной устойчивости или отсыпки, то повышение гидростатического давления приводит к



повышению порового давления на смежных участках ГТС, что приводит к выходу фильтрующихся вод на поверхность вышележащих полок. В результате также происходит суффозионный вынос материала и скопление его вместе с водой, просочившейся на поверхность этих полок. После прохождения периода половодья уровень воды в прудке снижается, что приводит к снижению гидростатического давления, после чего прекращается выход фильтрующейся воды на поверхность полки. В результате на поверхности полки, расположенных над фильтрационным ходом, образуются следы суффозионного выноса материала, которые являются индикатором наличия локальных нарушений фильтрационной устойчивости.

#### *Локальные оседания поверхности полок насыпных ГТС*

На участке локального нарушения фильтрационной устойчивости происходит концентрация водного потока, которая приводит к постепенному суффозионному выносу материала ГТС. Развивающийся суффозионный вынос материала приводит к формированию фильтрационного хода в теле сооружения. Фильтрационный ход позволяет реализоваться гидростатическому давлению воды прудка, не приводя к серьезным негативным последствиям. Однако при применении различных методов повышения фильтрационной устойчивости или отсыпке ГТС у его основания происходит передача гидростатического давления от прудка к основанию сооружения и преобразование его в поровое давление. В результате, как описано выше, происходит суффозионный вынос материала ГТС, что приводит к формированию полостей в теле сооружения. Когда полости достигают критических значений, происходит сползание и обрушение материала ГТС в полости, что выражается на поверхности сооружения как локальные оседания и обрушения. Примеры подобных деформаций представлены на рис. 3, на котором видно, что деформации поверхности полок ГТС в основном имеют вид оседания или провалов. Таким образом, локальные оседания поверхности полок ГТС могут служить индикатором наличия фильтрационного хода в теле сооружения.



Рис. 3 – Локальные деформации поверхности полок ГТС

### Сконцентрированный выход фильтрующихся вод в основании сооружения или отдельных уступов

В отличие от нормальных фильтрационных процессов в теле ГТС, локальные нарушения фильтрационной устойчивости приводят к концентрации потоков и формированию выходов на поверхность фильтрующихся вод. В связи с этим сконцентрированный выход фильтрационных потоков на поверхность может служить индикатором наличия локальных нарушений фильтрационной устойчивости и фильтрационных ходов. На рис. 4 представлены фотоснимки выходов фильтрующихся вод на поверхность в основании ГТС и на его полке.



Рис. 4 – Выходы фильтрующихся вод на поверхность

Для идентификации и интерпретации процессов, происходящих в теле ГТС, важно не только наличие выходов фильтрационных вод на поверхность, но и их расположение. Особое внимание необходимо уделять выходам фильтрующихся вод на поверхность полок сооружения.

Так, сконцентрированный выход фильтрующихся вод у основания ГТС свидетельствует о сформировавшемся локальном нарушении фильтрационной устойчивости или фильтрационном ходе, но не позволяет сам по себе оценить негативное влияние данных процессов на надежность сооружения. С другой стороны, выход фильтрующихся вод на поверхность вышележащих полок не только служит индикатором локальных нарушений фильтрационной устойчивости. Он также может указывать на проявление гидростатического давления воды ограждаемого прудка, которое передается по фильтрационному ходу и преобразуется в поровое давление, которое приводит к повышению уровня фильтрующихся вод на локальном участке и выходу этих вод на поверхность. Такие выходы фильтрационных вод на поверхность могут приводить к суффозионному выносу материала ГТС и приводить к негативным последствиям, описанным выше.

#### *Фонтанирование воды у основания сооружения*

На практике не всегда возможно идентифицировать сконцентрированный выход фильтрующихся вод у основания сооружения из-за наличия стоячей или проточной воды в нижнем бьефе ГТС: прудок, водоулавливающая канава, озеро, река и другие. В таком случае индикатором наличия локального нарушения фильтрационной устойчивости может служить фонтанирование воды у основания сооружения, пример которого представлен на рис. 5.

Фонтанирование воды у основания ГТС может служить не только индикатором наличия локального нарушения фильтрационной устойчивости, но также указывает и на реализацию относительно высокого уровня гидростатического давления через фильтрационный



ход. В связи с этим данный индикатор локального нарушения фильтрационной устойчивости также может указывать на опасность применения существующих методов фильтрационной защиты на данном участке. Данная опасность связана прежде всего с тем, что при восстановлении фильтрационной устойчивости на данном участке гидростатическое давление будет передаваться по фильтрационному ходу от ограждаемого прудка до места применения методов повышения фильтрационной устойчивости и далее трансформироваться в поровое давление, что может привести не только к суффозионному выносу материала сооружения, но и к изменению параметров устойчивости данного участка ГТС.



Рис. 5 – Фонтанирование воды у основания сооружения

#### *Локальное поднятие поверхности полки*

Выше изложено, что локальное оседание поверхности полки является индикатором наличия нарушения фильтрационной устойчивости. Однако указывать на наличие локального нарушения фильтрационной устойчивости может не только оседание, но и локальное поднятие или пучение поверхности полки. На рис. 6 представлены примеры локального поднятия поверхности полки насыпного ГТС.

В целом для насыпных ГТС свойственно постепенное, равномерное оседание поверхности сооружения в первые годы после отсыпки, которое связано с уплотнением и консолидацией материала сооружения и которое происходит в масштабах всего сооружения или крупных его элементов. Поднятие поверхности ГТС встречается редко, и из-за небольших масштабов сложно идентифицируемо.

Локальное поднятие поверхности ГТС может возникать вследствие реализации гидростатического давления воды ограждаемого прудка через фильтрационные ходы. При накоплении гидростатического давления в фильтрационном ходе, что может быть вызвано, например, изменением уровня воды в ограждаемом прудке или повышением фильтрационной устойчивости сооружения у основания, повышенное давление преобразовывается в поровое давление фильтрующейся в теле сооружения воды. Повышение порового давления приводит к расширению пор между частицами материала насыпного ГТС. Это приводит к поднятиям поверхности полки на локальных участках, которые расположены вблизи с локальными нарушениями фильтрационной устойчивости и фильтрационными ходами.

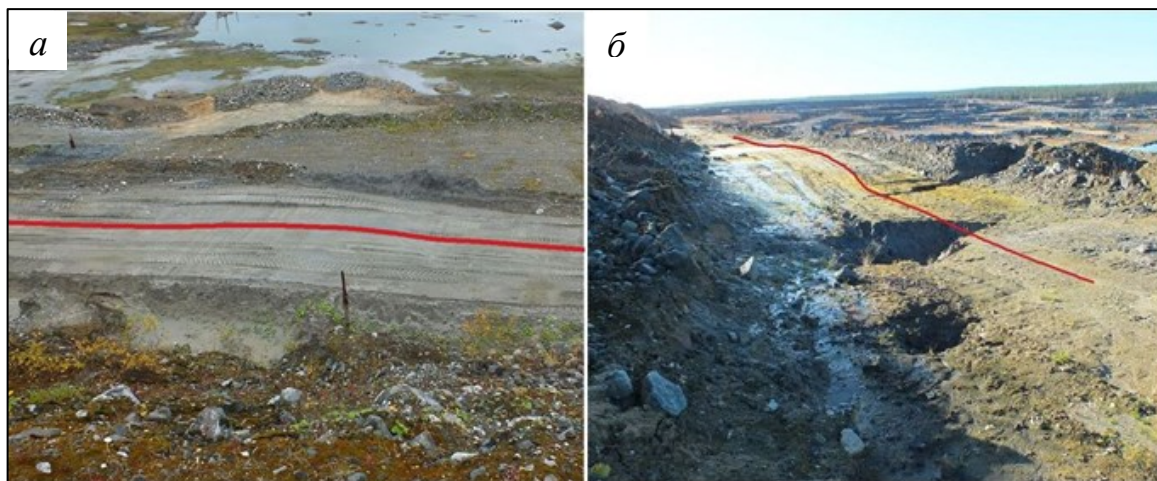


Рис. 6 – Локальные поднятия поверхности насыпного ГТС

Идентификация локальных поднятий осложняется не только общей тенденцией материала сооружения к консолидации и оседанию и узколокальным характером поднятия, но и тем, что на участках поднятия происходит усиленный вынос частиц ГТС, что на следующем этапе приводит к образованию оседания и провалов на данном участке. Также оседание может быть вызвано падением гидростатического давления в фильтрационном ходе и, следовательно, порового давления, что приводит к повторному циклу консолидации материала ГТС и оседанию поверхности полки. На рис. 7 приведены примеры участков с совмещением локальных поднятий и оседаний поверхности полки.

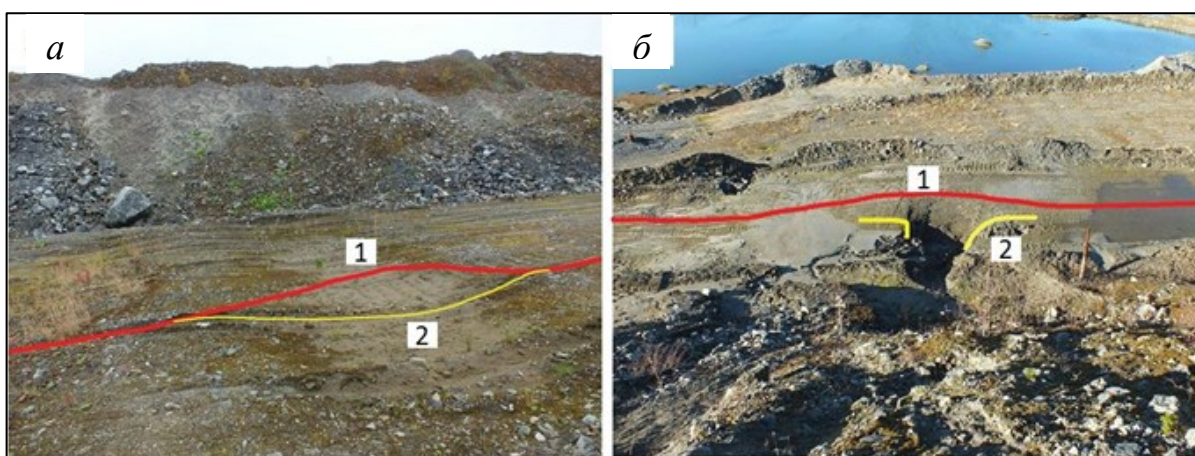


Рис. 7 – Деформации поверхности насыпного ГТС:  
1 – линия первоначального локального поднятия;  
2 – линия последующего локального оседания и обрушения

На фотографиях, представленных на рис. 7, видно маскирующее действие локальных оседаний (рис. 7а) и обрушений (рис. 7б), которые скрывают локальные поднятия поверхности полки. На участках ГТС, представленных на рис. 7, первоначально развивался процесс локального поднятия, представленный линией 1, который впоследствии сменился процессом оседания и обрушения – линия 2.

Между этапом локального поднятия и оседания поверхности насыпных ГТС может проходить относительно небольшой промежуток времени (меньше месяца), что еще больше осложняет обнаружение данного индикатора, а также обуславливает целесообразность регулярных ежемесячных обследований сооружения.

### Выводы

Таким образом, основываясь на воздействии локальных нарушений фильтрационной устойчивости и фильтрационных ходов на насыпное ГТС, сформулированы основные индикаторы наличия подобных нарушений в теле сооружения:

- следы суффозионного выноса материала сооружения;
- локальные оседания поверхности полок насыпных ГТС;
- сконцентрированный выход фильтрующихся вод в основании сооружения или отдельных уступов;
- фонтанирование воды у основания сооружения;
- локальное поднятие поверхности полки.

Выделение индикаторов наличия локальных нарушений фильтрационной устойчивости и фильтрационных ходов позволяет разработать алгоритм идентификации подобных нарушений на основании визуального обследования ГТС.

### Литература

1. Internal erosion of exiting dams, levees and dikes, and their foundations. Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance” // International commission on large dams. Bulletin. - 2016. - № 164. - P. 199.
2. Azam S., Li Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years // Geotechnical News. - 2010. - P. 50 - 53.
3. J.-F. Vanden Berghe, J.-C. Ballard, M. Pirson, U. Reh Risks of Tailings Dams Failure // ISGSR 2011 - Vogt, Schuppener, Straub & Bräu (eds). - 2011. - P. 209 - 216.
4. Баев О.А. Противофильтрационные мероприятия на грунтовой плотине / О.А. Баев, А.М. Баева // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. - 2014. - № 56-1. - С. 13 - 20.
5. Максимов Д.А. Механизмы негативного влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на надежность насыпных гидротехнических сооружений / Д.А. Максимов // Проблемы недропользования. – 2018. - № 2 (в печати).
6. David M. Chambers, Bretwood Higman. Long-term Risk of Tailings Dam Failure // Series: Alaska Park Science - Volume 13 Issue 2: Mineral and Energy Development. - 2011. - P. 34.
7. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон № 117-ФЗ от 23 июня 1997 г. [Электронный ресурс] - Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_15265/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/)
8. Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов (ПБ 03-438-02) [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data1/10/10706/>
9. Инструкция о порядке ведения мониторинга безопасности гидротехнических сооружений предприятий, организаций, подконтрольных органам Госгортехнадзора России (РД 03-259-98) [Электронный ресурс]- Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data1/7/7762/>
10. Максимов Д.А. Экономические тенденции изысканий и мониторинга накопителей жидких горнопромышленных отходов в арктической зоне для целей декларирования их промышленной безопасности / Д.А. Максимов, А.И. Калашник // Север и рынок: формирование экономического порядка. - 2018 (в печати).