

УДК 627.824.31

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

### МЕХАНИЗМЫ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НА НАДЕЖНОСТЬ НАСЫПНЫХ ГИДРОТЕХ- НИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*Аннотация:*

Локальные нарушения фильтрационной устойчивости и фильтрационные ходы оказывают значительное влияние на устойчивость насыпных гидротехнических сооружений (ГТС), аварии на которых приводят к прекращению деятельности всего горнорудного предприятия, а также к значительному экономическому, экологическому и социальному ущербу. Локальные протечки являются причиной 31 % аварий на ГТС. В связи с этим статья посвящена рассмотрению механизмов негативного влияния таких нарушений на надежность насыпных ГТС.

Локальное нарушение фильтрационной устойчивости приводит к суффозионному выносу материала сооружения. В результате в теле ГТС образуются полости, которые, достигая критических размеров, приводят к разрушению всего сооружения или отдельных его частей. Также локальные нарушения приводят к перераспределению фильтрующихся в теле сооружения вод, которые характеризуются положением депрессионной кривой. В результате перераспределения фильтрующихся вод происходит прогнозируемое изменение депрессионной кривой, что оказывает существенное влияние на геометрию кривой скольжения и соотношение удерживающих и сдвигающих сил, действующих для данной кривой. В результате такое перераспределение приводит к нарушению баланса сил и разрушению отдельных элементов или всего сооружения. Кроме влияния на фильтрующиеся воды, фильтрационный ход также является структурной неоднородностью в теле ГТС. В связи с этим он оказывает значительное влияние на устойчивость элементов сооружения, которые подсекает. Кроме того, фильтрационный ход влияет на устойчивость сооружения, так как является каналом передачи гидростатического давления от ограждаемого прудка к основанию сооружения. В результате возникает сила, действующая на ГТС в районе его основания и направленная вертикально. Данная сила может привести к разрушению сооружения или отдельных его элементов. Особую опасность представляют случаи применения у основания сооружения каких-либо методов противофильтрационной защиты, так как в данном случае происходит концентрация гидростатического давления на небольших участках основания ГТС. Данный механизм не только влияет на устойчивость сооружения, но и делает опасным применение многих методов противофильтрационной защиты ГТС.

*Ключевые слова:* гидротехническое сооружение, механизмы разрушения, фильтрационная устойчивость, суффозионный вынос, депрессионная кривая, кривая скольжения, структурная неоднородность, гидростатическое давление, противофильтрационная защита

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.090

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

### MECHANISMS OF NEGATIVE INFLUENCE OF LOCAL FILTRATION STABILITY DISTURBANCES ON THE MADE GROUND HYDROTECHNICAL FACILITIES RELIABILITY

*Abstract:*

The local disturbances of filtration stability and filtration paths have a significant impact on the stability of ground hydrotechnical facilities, where accidents lead to the entire cessation of mining enterprise activity, as well as to significant economic, environmental and social damage. Local leakages are a cause of 31% of accidents on hydrotechnical facilities. In this regard, the article considers the negative impact mechanisms of such disturbances on the reliability of made ground hydrotechnical facilities.

A local disturbance in filtration stability leads to a suffosion removal of facility material. As a result, in a hydrotechnical facility body cavities are formed, which reach critical dimensions and lead to destruction of an entire facility or its several parts. Local disturbances also lead to redistribution of water filtering in a facility body, which is characterized by the depression curve position. As a result of redistribution, the depression curve changes unpredictably. This has a significant effect on the geometry of the slip curve and the ratio of the holding and shearing forces acting for the curve given.

As a result, such redistribution leads to a disruption in the balance of forces and destruction of individual elements or the entire facility. In addition to influencing filtered water, a filtration path is also a structural heterogeneity in the body of the hydrotechnical facility. In this regard, it has a significant impact on the stability of facility elements, which it undercuts. In addition, the filtration path impacts on the stability of a facility as it is a canal for transferring the hydrostatic pressure from an enclosed pond to the facility foundation.

As a result, there is a force acting on the hydrotechnical facility near its foundation and vertically directed. This force can lead to the destruction of the facility or some its elements. Particularly dangerous are cases of application of any anti-filtration protection methods at the foundation of the construction, because in this case the hydraulic pressure concentrates in small parts of the hydrotechnical facility foundation. This mechanism impacts on the stability of a facility and also makes it dangerous to use many anti-filtration protection methods for a hydrotechnical facility.

*Key words:* hydrotechnical facility, dam, destruction mechanisms, filtration stability, suffosion removal, erosion, depression curve, slip curve, structural heterogeneity, hydraulic pressure, anti-filtration protection

### Введение

Насыпные гидротехнические сооружения (ГТС) играют важную роль в современной промышленности. Так, например, от надежности ограждающих ГТС хвостохранилищ зависит работа всего горнорудного предприятия, связанного с этим сооружением [1]. Аварии, происходящие на насыпных ГТС, приводят к огромному экологическому, экономическому и социальному ущербу [2]. В связи с этим особое внимание уделяется надежности насыпных ГТС, на которую значительное влияние оказывают фильтрационные процессы, происходящие в теле этих сооружений. Учет фильтрационных процессов осуществляется путем измерений уровня воды в пьезометрах, построения по створам депрессионных кривых и сравнения уровня депрессионных кривых с проектными критическими значениями. Однако в теле таких сооружений наблюдаются не только проектные фильтрационные потоки, характеризующиеся уровнем депрессионной кривой, но и аномальные, локальные фильтрационные потоки, связанные с локальными нарушениями фильтрационной устойчивости ГТС [3, 4]. Влияние локальных нарушений фильтрационной устойчивости насыпных ГТС, как правило, не учитывается при проектировании и организации мониторинга, но тем не менее является одной из основных причин аварий на ГТС во всем мире, что подтверждается анализом причин аварий. Так, по данным исследований, 31 % аварий, произошедших с 1910 по 1999 г., были вызваны локальными протечками [5].

В связи с этим актуальной является задача рассмотрения различных механизмов влияния локальных нарушений на ГТС или отдельные его элементы, что позволит разработать индикаторы, позволяющие при проведении визуального мониторинга сооружения обнаруживать локальные нарушения фильтрационной устойчивости и фильтрационные ходы.

#### *Суффозионный вынос материала и размыв*

Первый рассматриваемый механизм связан с суффозионным выносом материала и размывом элементов сооружения фильтрующейся водой в местах локального нарушения фильтрационной устойчивости.

Вынос материала насыпных ГТС фильтрующейся в их теле водой – явление пространственное, особенно для сооружений, которые имеют локальные нарушения фильтрационной устойчивости, сопровождающиеся формированием фильтрационных ходов. На рис. 1 представлены фотоснимки суффозионного выноса материала ограждающей дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия Мурманской области.



Рис. 1 – След суффозионного выноса материала дамбы

Суффозионный вынос материала, показанный на рис. 1, носит периодический характер. Также на рис. 1 видно, что вынос материала происходил не с поверхности сооружения, а из самого тела сооружения, что представляет серьезную опасность для его устойчивости.

В качестве примера того, что привело к аварии, может служить разрушение насыпной плотины Титон, находившейся на одноименной реке в США, штат Айдахо. Разрушение плотины произошло 5 июня 1976 г. На рис. 2 показано развитие процесса разрушения.



Рис. 2 – Разрушение плотины Титон 5 июня 1976 г. [6]

Разрушение плотины Титон произошло из-за действия фильтрующейся через тело сооружения воды. Фильтрующаяся вода привела к постепенному выносу материала плотины. Формировался фильтрационный ход, фильтрационный поток в котором повышался вследствие снижения фильтрационных свойств сооружения. Увеличившийся поток приводил к дальнейшему выносу материала сооружения. Однако данные процессы происходили скрыто: на поверхности наблюдался лишь небольшой выход фильтрующейся воды. В связи с этим угроза была недооценена, и в результате вынос материала плотины привел к аварии, которая, как видно из рис. 2, развивалась лавинообразно. Также на рис. 2 видна вскрывающаяся в результате аварии полость в теле ГТС, которая была образована фильтрующейся водой.

В результате аварии выплеснулось порядка 300 млн м<sup>3</sup> воды, разрушено 200 домов, 14 человек погибли. Ущерб от аварии оценивается в 1 млрд. долларов США.

#### *Перераспределение фильтрующихся вод*

Вода, фильтрующаяся в теле насыпного ГТС, оказывает существенное влияние на устойчивость сооружения вследствие изменения соотношения удерживающих и сдвигающих сил, действующих как на отдельных участках, так и в рамках всего сооружения, а также за счет изменения геометрии кривой скольжения в целом. Распределение воды и

фильтрационные процессы в теле ГТС характеризуются уровнем депрессионной кривой, которая определяется измерением уровня воды в пьезометрах, расположенных створами на сооружении. При проектных расчетах насыпных ГТС, которые проводятся не реже одного раза в пять лет для сооружений I-го класса, расчет производится для различных положений депрессионной кривой. В дальнейшем при эксплуатации положение депрессионной кривой регулярно определяется и сравнивается с расчетными значениями.

При проектной фильтрационной устойчивости ГТС положение депрессионной кривой вдоль оси сооружения изменяется несильно, и положение кривой в любой точке может быть получено интерполяцией значений соседних пьезометров. Однако при наличии в теле сооружения локальных нарушений фильтрационных свойств положение этой кривой может претерпевать существенные изменения. Для примера рассмотрим график изменения уровня воды на одном из горизонтов дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики горнорудного предприятия Мурманской области, изображенный на рис. 3.



Рис. 3 – Изменение уровня воды вдоль уступа дамбы

Уровни воды, представленные на рис. 3, получены по данным измерений с помощью пьезометрических скважин и георадарного профилирования, проведенных в январе 2016 г. Как видно из графика, уровень воды способен существенно меняться вдоль оси сооружения: на участке длиной 100 м глубина воды изменяется на 50 % от 4 до 6 м. Подобная разница в значениях приводит к существенным колебаниям положения депрессионной кривой, что может угрожать безопасности сооружения, особенно если мониторинг положения уровня воды осуществляется такими дискретными методами измерения, как измерения с помощью пьезометрических скважин. В результате может сложиться ситуация, при которой в пьезометрических створах уровень депрессионной кривой остается в пределах проектных значений, но на участках, не охватываемых сетью пьезометров, уровень депрессионной кривой превышает критические значения, что угрожает устойчивости всего сооружения.

При рассмотрении влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на положение депрессионной кривой в теле сооружения и его устойчивость, необходимо отметить дестабилизирующее влияние таких нарушений на скорость протекания фильтрационных процессов на разных участках сооружения. Так, при нормальной работе ГТС, в котором отсутствуют нарушения фильтрационной устойчивости, фильтрационные процессы происходят равномерно. Это позволяет контролировать положение депрессионной кривой на разных участках сооружения, меняя такие технологические параметры, как скорость сброса воды, схемы намыва, план отсыпки и т.п. Тем самым осуществляется управление устойчивостью всего сооружения. Однако при локальных нару-

шениях фильтрационной устойчивости фильтрационные процессы в сооружении происходят неравномерно, что затрудняет или делает невозможным осуществление контроля за устойчивостью сооружения.

#### *Фильтрационный ход как структурная неоднородность*

Локальное нарушение фильтрационной устойчивости сооружения приводит к образованию структурных неоднородностей, которые могут представлять собой фильтрационные ходы, обладающие пониженными прочностными свойствами относительно ненарушенных участков, или локальные полости в теле сооружения, образующиеся в результате выноса материала ГТС фильтрующимися водами.

Для демонстрации влияния локальных неоднородностей на устойчивость сооружения рассмотрим влияние угла падения и мощности структурной неоднородности на коэффициент устойчивости уступа (отношение удерживающих и сдвигающих сил). На рис. 4 представлена расчетная модель уступа насыпного ГТС, содержащая зону ослабления [7].

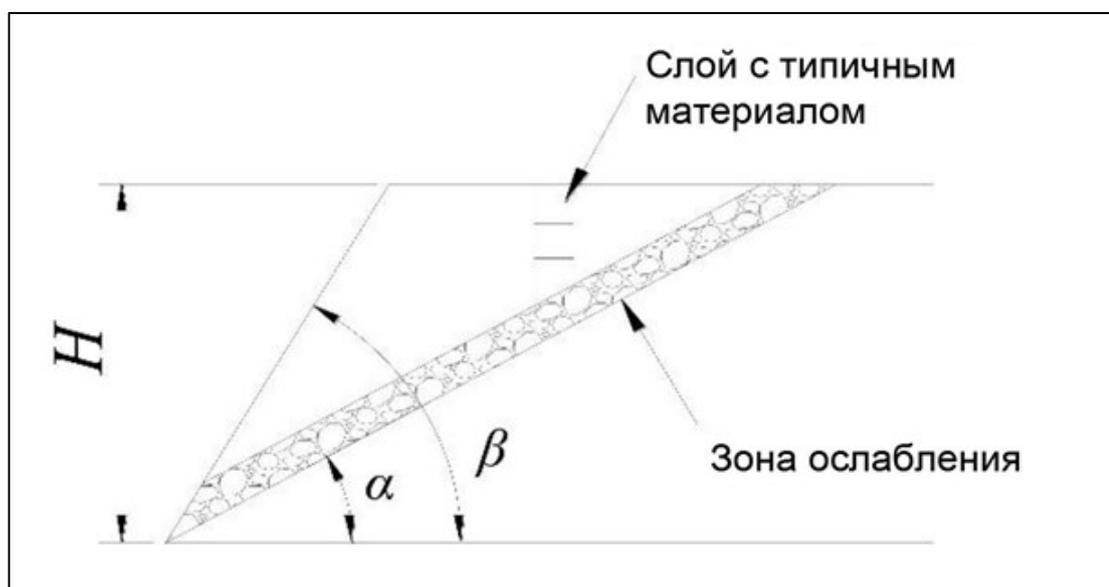


Рис. 4 – Расчетная схема модели (перевод автора) [7]:  
 $\alpha$  – угол зоны ослабления;  $\beta$  – угол откоса уступа

Угол наклона уступа в расчетной модели, представленной на рис. 4, оставался постоянным и равным  $35^\circ$ . Угол наклона зоны ослабления и мощность этой зоны варьировались. Расчет проводился с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов. Результаты расчета представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, зона ослабления оказывает значительное влияние на устойчивость откоса, особенно при значительной мощности и угле наклона зоны ослабления. Так, при росте мощности зоны ослабления от 0,1 до 1 м коэффициент устойчивости может меняться до двух раз в зависимости от расположения этой зоны, при этом коэффициент устойчивости падает ниже значения в 1, что означает расчетную потерю устойчивости уступом. Таким образом, наличие зоны ослабления, которой является фильтрационный ход в теле насыпного ГТС, существенно влияет на устойчивость сооружения.

Также влияние структурных неоднородностей на устойчивость уступов подтверждает и опыт оценки устойчивости уступов скальных пород в различных условиях. Так, многие исследования показывают негативное влияние неоднородностей среды на устойчивость скальных уступов, особенно при расположении плоскости этих неоднородностей параллельно борту карьера [8 – 11].

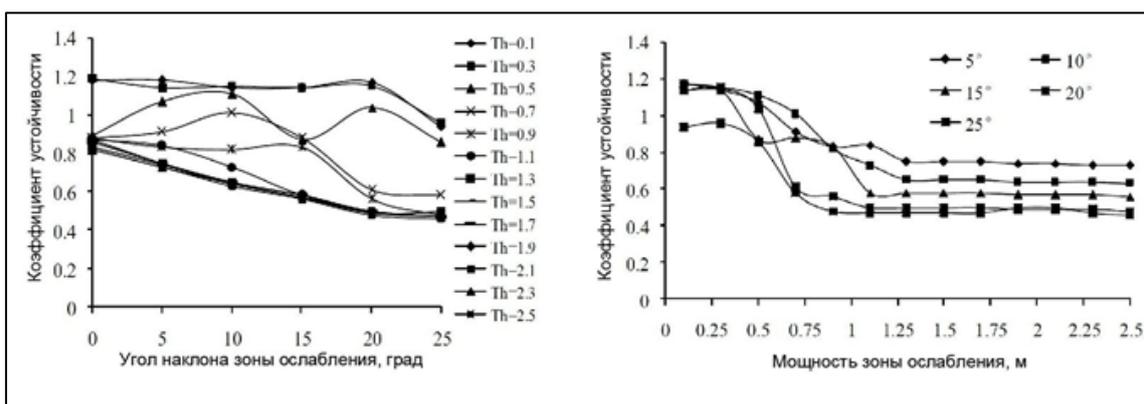


Рис. 5 – Зависимость коэффициента устойчивости от угла наклона и мощности зоны ослабления [7]

#### *Гидростатическое давление*

Четвертый механизм связан с гидростатическим давлением в фильтрационном ходе.

В процессе эксплуатации ГТС горнорудных предприятий происходят частые изменения уровня воды в ограждаемом прудке. Это происходит вследствие периодического намыва пляжей хвостохранилища, закачки в прудок технических вод, климатических явлений (осадки, таяние снега и льда) и других причин. В результате изменения уровня воды в прудке, а также увеличения притока воды с пляжа хвостохранилища и с поверхности самого сооружения повышается также количество воды, фильтрующейся через ГТС. При нормальном режиме работы ГТС повышение уровня воды, фильтрующейся через сооружение, происходит плавно и сопровождается изменением положения уровня депрессионной кривой, определяемой по данным пьезометров.

Наличие локальных нарушений фильтрационных свойств ГТС приводит к существенному и опасному дисбалансу вод в теле сооружения. Так, фильтрационные ходы проходят сквозь тело сооружения и связывают его основание и ограждаемый им прудок. Это приводит к тому, что образуется прямая связь по принципу сообщающихся сосудов, которая передает гидростатическое давление из вышележащего прудка в область основания ГТС. Особенно данное явление опасно при применении специальных мер по повышению фильтрационных свойств сооружения у его основания, так как в результате возникает сила расширения, пропорциональная гидростатическому давлению внутри хода, что может существенно уменьшить устойчивость сооружения в районе его основания и привести к аварии.

Ярким примером реализации рассматриваемого механизма является разрушение дамбы на искусственном озере Ситу Гинтунг (Тангеранг, Индонезия), произошедшее 27 марта 2009 г. В результате разрушения порядка 1 млн м<sup>3</sup> воды было выброшено в заселенный район города. Порядка 100 – 200 человек не смогло спастись. Пострадало большое количество домов.

На первый взгляд казалось, что причиной данной аварии не является размыв: не было зафиксировано никаких признаков эрозии, суффозии или протечек. Однако дальнейшие исследования показали, что авария произошла в результате нарушения фильтрационных свойств дамбы. На рис. 6 представлена схема механизма протекания процесса разрушения.

Как видно из рис. 6, уровень воды в искусственном озере Ситу Гинтунг не превышал допустимых расчетных значений. Однако при безопасном уровне воды происходили процессы локального нарушения фильтрационной устойчивости сооружения. В результате действия солнца на свободные участки поверхности дамбы в верхнем бьефе образовывались небольшие трещины, которые при повышении уровня воды заполнялись ей. Попавшая в трещины вода не позволяла им закрыться, а при еще большем повышении

уровня воды происходил гидроразрыв трещин, сопровождаемый их расширением и углублением. Постепенно вода формировала области с пониженными фильтрационными свойствами, по которым попадала все глубже по направлению к основанию дамбы. Гидростатическое давление, возникающее из-за разницы уровня воды в резервуаре и основании дамбы, передавалось к основанию сооружения, приводя к возникновению силы, направленной на поднятие тела дамбы. Реализоваться силе поднятия мешала скальная наброска, которая давила на поверхность дамбы силой тяжести. Результатом взаимодействия этих двух сил явилось появление результирующей поднимающей силы в основании у самого подножия дамбы величиной порядка 100 кПа, что привело к нарушению устойчивости дамбы на данном участке и ее разрушению. Таким образом, результатом нарушения фильтрационных свойств дамбы явилось разрушение сооружения.

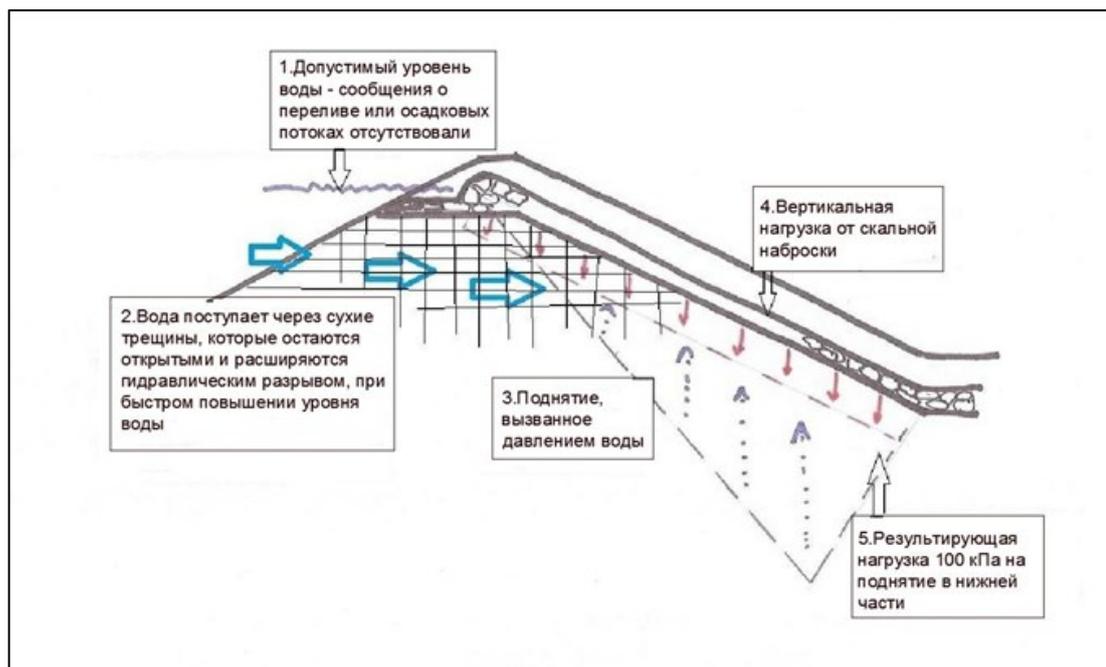


Рис. 6 – Пошаговый механизм разрушения дамбы Ситу Гинтунг (перевод автора) [6]

Таким образом, видно, что локальное нарушение фильтрационной устойчивости, представляющее собой фильтрационный ход, передает гидростатическое давление веса воды в прудке к основанию сооружения, что несет серьезную опасность для его безопасности. Вместе с тем передача гидростатического давления по фильтрационному ходу делает использование многих методов повышения фильтрационной устойчивости не только нецелесообразным, но и опасным для сооружения.

#### Выводы

Выполненный анализ механизмов негативного влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости показал следующее:

- локальные нарушения фильтрационных свойств насыпных ГТС и фильтрационные ходы несут серьезную угрозу безопасности всего сооружения и часто являются причиной аварий и разрушений;
- наличие локальных нарушений фильтрационной устойчивости приводит к суффозионному выносу материала насыпного ГТС;
- локальное нарушение фильтрационной устойчивости влияет на распределение фильтрующихся в теле ГТС вод, приводя к непрогнозируемому изменению депрессионной кривой на смежных участках, а соответственно, и к изменению устойчивости сооружения на данных участках;

- фильтрационный ход является структурной неоднородностью, зоной ослабления, приводя к ухудшению устойчивости подсекаемых уступов ГТС;
- по фильтрационному ходу происходит передача гидростатического давления от ограждаемого прудка к основанию ГТС, что способно значительно ухудшить устойчивость сооружения и привести к его разрушению;
- для насыпных ГТС, в теле которых присутствуют локальные нарушения фильтрационной устойчивости, применение существующих методов повышения и восстановления фильтрационной устойчивости опасно и может привести к ухудшению надежности и разрушению этих сооружений.
- выделенные механизмы влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на надежность насыпных ГТС дают базу для формулирования индикаторов наличия данных нарушений на отдельных участках и сооружениях в целом.

### Литература

1. Экономические аспекты исследований состояния гидротехнического сооружения накопителя жидких промышленных отходов / А.И. Калашник, А.А. Гилярова, Н.А. Калашник, Д.А. Максимов, О.В. Смирнова // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2015. – № 6. – С. 23 – 26.
2. 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 (в печати).
3. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А.А. Данилкин, А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, Д.А. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 7. - С. 344 - 351.
4. Максимов Д.А. О недостаточности существующих методов повышения противофильтрационной устойчивости насыпных гидротехнических сооружений горного профиля / Д.А. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (в печати).
5. Azam S., Li Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years // Geotechnical News. - 2010. - P. 50 - 53.
6. “Internal erosion of existing 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.
7. Garmondyu E. Crusoe Jr, Cai Qing-xiang, Shu Ji-sen, Han Liu, Yamah J. Barvor Effects of weak layer angle and thickness on the stability of rock slopes // International journal of mining and geo-engineering. - 2016. - Vol. 50. - № 1. - P. 97 – 110.
8. Геомеханическое обеспечение технических решений при ведении горных работ в высоконапряженных массивах / А.А. Козырев, В.И. Панин, И.Э. Семенова, Ю.В. Федотова, В.В. Рыбин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2012. - № 2. - С. 46 - 55.
9. Козырев А.А. Геомеханическое обоснование рациональных конструкций бортов карьеров в тектонически напряженных массивах / А.А. Козырев, В.В. Рыбин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - 2015. - № 2. - С. 245 - 250.
10. Козырев А.А. Характерные особенности напряженно-деформированного состояния в борту глубокого карьера по результатам численного моделирования / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, И.М. Аветисян // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - № 56. - С. 264 - 272.
11. Мельников Н.Н. Изменение геодинамического режима геологической среды при ведении крупномасштабных горных работ на глубоких карьерах / Н.Н. Мельников, А.А. Козырев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - № 56. - С. 7 - 23.