



Автор фото: Аптикаева Г.Ф.

# МОНИТОРИНГ ФИЛЬТРАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ И ВОКРУГ ПЛОТИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ: КРАТКИЙ ОБЗОР

Принята к публикации 30.12.2025

Опубликована 30.01.2026

## КАЙОДЕ О.Т.

Отделение геофизики физического факультета Университета «Ковенант», г. Ота, штат Огун, Нигерия

## ОДУКОЙЯ А.М.

Факультет наук о Земле Университета Лагоса, г. Лагос, штат Лагос, Нигерия

## АДАГУНОДО Т.А.

Отделение геофизики физического факультета Университета «Ковенант», г. Ота, штат Огун, Нигерия

## АДЕНИДЖИ А.А.

Факультет физики и солнечной энергии Университета Боузена, г. Иво, штат Осун, Нигерия

## АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод доклада нигерийских специалистов «Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг плотин с использованием геофизических методов: краткий обзор» (Kayode et al., 2018), сделанного на 2-й Международной научной конференции по устойчивому развитию и смежным наукам. Материалы этой конференции были опубликованы в соответствующем сборнике серии IOP Conference Series: Earth and Environmental Science («Материалы конференций издательства IOP: секция наук о Земле и окружающей среде»). Данная серия выпускается британской благотворительной научной организацией IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Оригинал представленного доклада нигерийских авторов (Kayode et al., 2018) находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить и адаптировать его при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для перевода приводится в конце.

Медленное просачивание жидкости или газа через пористый материал или небольшие отверстия называется фильтрацией. В инженерной геологии это фильтрация воды сквозь грунты. Данный процесс часто представляет собой серьезную проблему для фундаментов зданий, а также для грунтовых плотин. Фильтрация воды через плотины или рядом с ними – причина большинства их прорывов, которые обычно носят катастрофический характер, приводят к многочисленным человеческим жертвам, разрушению инфраструктуры и потерям имущества. Поэтому мониторинг фильтрации в пределах и вокруг этих сооружений становится необходимым условием для поддержания их устойчивости.



В данной статье приводится обзор геофизических методов, используемых для мониторинга и контроля фильтрации в пределах и вокруг земляных плотин. Результаты этого исследования могут быть полезны главным образом для инженерных изысканий на площадках будущего строительства плотин, для обследования эксплуатируемых плотин и прилегающих к ним участков, а также для контроля качества их грунтовых оснований.

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

грунтовая плотина; фильтрация; повреждение; разрушение; мониторинг фильтрации; геофизические методы; электротомография; метод естественного электрического поля; метод вызванной поляризации.

#### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кайоде О.Т., Одукоя А.М., Адагунодо Т.А., Адениджи А.А. Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг плотин с использованием геофизических методов: краткий обзор (пер. с англ.) // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 82–88. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-82-88.

# MONITORING OF SEEPAGES AROUND DAMS USING GEOPHYSICAL METHODS: A BRIEF REVIEW

Accepted for publication 30.12.2025

Published 30.01.2026

#### KAYODE O.T.

Department of Physics, Geophysics Unit, Covenant University, Ota, Ogun State, Nigeria

#### ODUKOYA A.M.

Department of Geosciences, University of Lagos, Lagos, Lagos State, Nigeria

#### ADAGUNODO T.A.

Department of Physics, Geophysics Unit, Covenant University, Ota, Ogun State, Nigeria

#### ADENIJI A.A.

Department of Physics and Solar Energy, Bowen University, Iwo, Osun State, Nigeria

#### ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the report “Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review” by Nigerian specialists (Kayode et al., 2018) at the 2nd International Conference on Science and Sustainable Development. The proceedings of that conference were published in the corresponding collection of the series “IOP Conference Series: Earth and Environmental Science”. The series is issued by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. The original work, which was used for the translation, is an open access paper under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, and adapted, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Kayode et al., 2018), which was used for the translation, is given in the end.

The slow escape of a liquid or gas through a porous material or small openings is called seepage. It is a process of seeping in soil engineering whereby water in soils move. Seepages often pose a grave problem in building foundations and also a common problem in earth dams (dams are structures built to retain water/fluid) due to abnormal or excessive leakage. Seepage through or around dams have been responsible for most dam failures. Dam failures are usually catastrophic with many fatalities and causing the destruction of infrastructure and properties. Therefore, monitoring of seepage through and around dams becomes a necessity to maintain dam stability.

This paper reviews the geophysical techniques which have been considered for the monitoring and control of seepages around dams. The main field of application of this investigation is subjected to site characterization and foundation quality assurance.

#### KEYWORDS:

earth dam; seepage; damage; failure; seepage monitoring; geophysical methods; electrical resistivity tomography; self-potential method; induced polarization method.

#### FOR CITATION:

Kayode O.T., Odukoya A.M., Adagunodo T.A., Adeniji A.A. Monitoring fil'tratsii v predelakh i vokrug plotin s ispol'zovaniem geofizicheskikh metodov: kratkii obzor (per. s angl.) [Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review (translation from English into Russian)] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 4. S. 82–88. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-82-88 (in Rus.).

#### ВВЕДЕНИЕ ►

Непрекращающиеся случаи разрушения плотин становятся важной темой для изучения в последние десятилетия.

В качестве основных причины этих разрушений рассматриваются недостаточные или недостоверные знания о грунтовых условиях, некачественное про-

ектирование фундамента плотины, а также чрезмерная фильтрация воды в ее теле и вокруг него [1]. Чтобы предотвратить серьезные потенциальные

опасности, которые неизменно связаны с подобными разрушениями, есть острая необходимость в исследованиях процессов фильтрации [2]. В связи с этим необходимо обсуждать важность использования геофизических методов для тщательного обследования и отображения внутреннего состояния плотин, что чрезвычайно важно для гражданского строительства, в том числе для создания и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Геофизические методы внесли огромный вклад в различные сферы человеческой деятельности, в том числе в мониторинг фильтрации через плотины и вокруг этих сооружений [3, 4]. И следует уделять больше внимания их применению в исследованиях окружающей среды. Благодаря использованию геофизических методов можно быстро и экономически эффективно получать информацию о геологическом строении на большой площади [5].

Как правило, плотины и водохранилища строятся преимущественно для орошения, водоснабжения, выработки гидроэлектроэнергии, защиты от наводнений или для тех или иных сочетаний перечисленного [6]. Во многих развитых странах, таких как США и Китай, плотины и водохранилища играют ключевую роль. Развитие гидроэнергетики и регулирование водных ресурсов в Китае стало возможным благодаря реализации проектов по строительству плотин и водохранилищ [7].

Серьезные разрушения грунтовых плотин происходят из-за фильтрации воды в них и на прилегающих территориях, однако если этот процесс остается в пределах проектных норм, то он не угрожает устойчивости сооружения. Но чрезмерная фильтрация неизбежно приводит к разрушению плотины, поскольку фильтрационные потоки делают сооружение неустойчивым, причем иногда уже в процессе поэтапного строительства [7].

Надежными индикаторами вероятных механизмов возникновения аномальной фильтрации являются результаты комплексного использования электротомографии и геотехнического мониторинга [8]. Существующие системы мониторинга фильтрации в большинстве своем мало чувствительны к незначительным изменениям фильтрационных потоков. Тем не менее востребованность в неинвазивных геофизических методах выросла, поскольку они позволяют выявлять аномальные проявления фильтрации на ранних стадиях [8].

В ряде работ была подтверждена значимость геофизических методов в исследованиях фильтрации в грунтовых плотинах. Среди них – метод электротомографии, который все более широко применяется для изучения фильтрации, для контроля устойчивости плотин и зданий [10–26]. Например, авторы работы [27] применили электротомографию при исследовании фильтрации в грунтовой плотине на Тайване. Эту плотину реконструировали для повышения уровня воды, после чего был проведен ряд повторных измерений в течение некоторого периода времени с целью изучения нескольких аномальных протечек, обнаруженных на низовом откосе сооружения. Интеграция результатов двумерной электротомографии и геотехнических данных позволила четко выявить вероятный механизм аномальной фильтрации.

Эффективность выявления аномальной фильтрации действительно может быть дополнительно повышена с помощью серии повторных измерений во времени [28, 29]. Так, авторы работы [30] применили 2D электротомографию для визуализации предполагаемых фильтрационных каналов в грунтовой плотине в нигерийском городе Зария. Этот метод был использован для диагностики изменений содержания воды в плотине и определения того, связаны ли они с аномальной фильтрацией в грунте или только с сезонными колебаниями. На основе интерпретации полученных данных были выделены различные зоны с относительно однородными значениями удельного электрического сопротивления. Результаты показали, что зоны с пониженным сопротивлением в пределах коренных пород представляют собой вероятные пути фильтрации. Таким образом, указанный геофизический метод был успешно применен для выявления путей фильтрации в коренных породах под грунтовой плотинной [30, 31].

Автор статей [32, 33] провел примечательное исследование с использованием различных геофизических методов, таких как электротомография, поверхностное электромагнитное и электрическое зондирование, для выявления причин потери воды на плотине Афамя В (являющейся частью системы плотин Аль-Афамя на реке Оронт в долине Аль-Гхаб в Сирии). Он отметил, что метод электротомографии был более эффективным и удобным для обнаружения проблем с инфильтрацией воды и протечками через коренные породы. Комплексные результаты приме-

нения указанных методов позволили выявить некоторые геологические структуры, которые оказывают негативное влияние и в конечном итоге могут привести к протечкам в основании плотины. Позднее было определено, что основной причиной рассматриваемой проблемы на этой плотине является вертикальная инфильтрация воды.

Авторы статьи [34] подготовили технико-экономическое обоснование возможности строительства второй очереди плотины электростанции на реке Гурара в северо-западной части Нигерии. Они использовали метод преломленных волн с разнесенной и симметричной расстановкой сейсмоприемников. Планируемое сооружение должно было располагаться на кристаллических коренных породах в северной части Центральной Нигерии. Результаты исследования показали высокую вероятность и значимые признаки фильтрации в этих материнских породах, а именно под западной частью предполагаемой оси плотины, где они оказались сильно трещиноватыми. Но все же в целом результаты показали пригодность исследованных материалов для строительства плотины.

Картина фильтрации и гидрогеологические механизмы, влияющие на нее, были изучены в том числе в районе городка Реймонд (Калифорния, США) [35] с использованием метода естественного электрического поля и метода электрического сопротивления постоянному току. Интерпретации их результатов способствовали имевшиеся до этого базовые сведения о гидрогеологических условиях и информация о типичных подповерхностных структурах, полученная на основе данных электроразведки, поскольку были рассмотрены различные сценарии фильтрации. Интерпретация данных, полученных методом естественного электрического поля, позволила выявить признаки фильтрации, согласующиеся с данными предыдущих наблюдений [36]. Правильная интеграция результатов геофизических исследований, данных по скважинам и численного моделирования позволяет лучше понять процессы фильтрации на исследуемых площадках [35].

В свете вышеизложенного в настоящей статье рассматривается эффективность электротомографии и других подходящих геофизических методов для выявления аномальной фильтрации в грунтовых плотинах и для более глубокого изучения возможных способов мониторинга таких аномальных процессов.

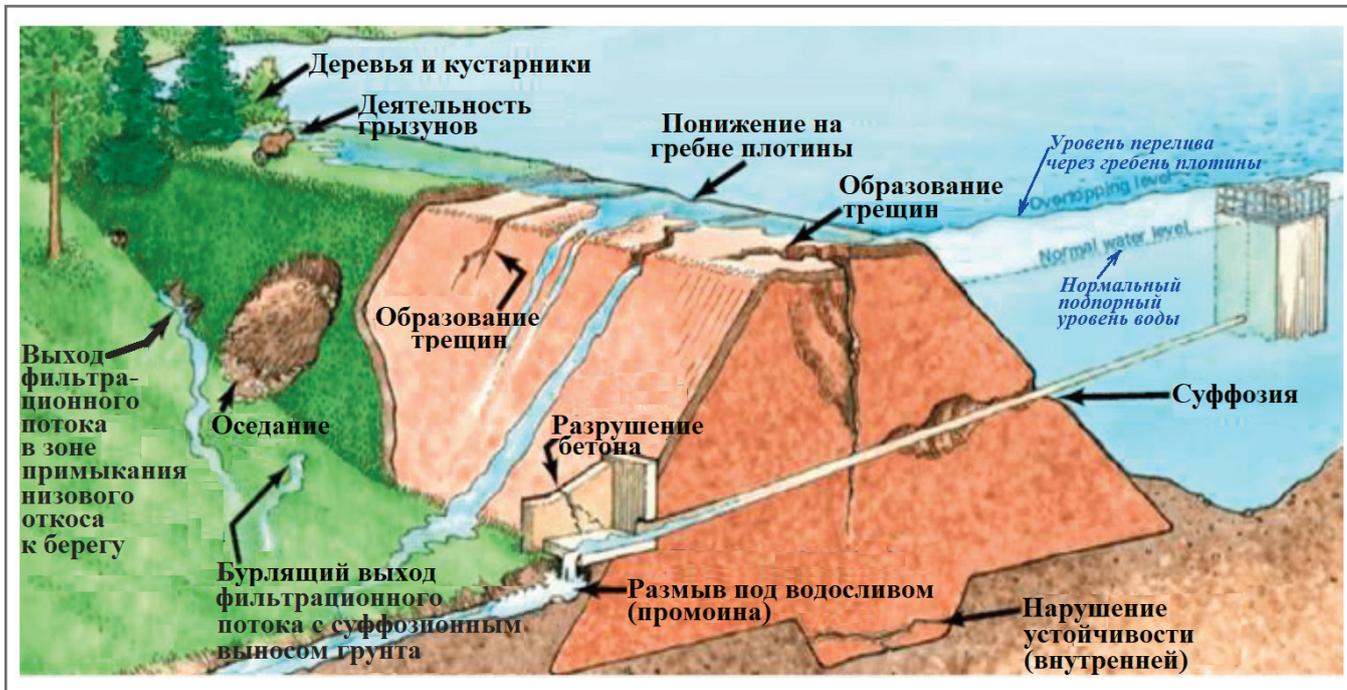


Рис. Факторы воздействия фильтрации на грунтовую плотину

### ПРИЧИНЫ ФИЛЬТРАЦИИ ►

Исследовано множество факторов, способствующих фильтрации в плотинах. К ним относятся: трещины в теле плотины или в ее основании, особенно открытые; рыхлые (особенно слабо уплотненные) грунты в основании; норы грызунов; откопка дренажных систем; деревья с глубокой корневой системой; морозное пучение; усадочные трещины в окружающем плотину грунте; вырванные с корнем деревья; землетрясения; чрезмерное фильтрационное противодействие; застойные и запертые грунтовые воды; недостаточно эффективная система дренажа сооружения [1, 6, 37–39].

Фильтрация характерна для всех грунтовых плотин – вода медленно просачивается сквозь них и их основания. Если фильтрационные силы достаточно велики, это может привести к вымыванию грунта, ослаблению его структуры и в конечном счете к оползням. При отсутствии надлежащего мониторинга фильтрационные процессы могут вызывать серьезные негативные последствия для сооружения и окружающей среды [40].

Другими характерными признаками фильтрации, отмеченными в работах [39, 40], являются:

1. Сезонные изменения температуры внутри плотины.
2. Быстрое снижение уровня воды в водохранилище ниже ожидаемого при обычной эксплуатации.

3. Скопление воды на участках вокруг плотины.

4. Снижение темпов роста растений вокруг плотины по сравнению с более удаленными участками.

5. Изменение окраски растений с нарушенным ростом.

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ФИЛЬТРАЦИИ НА ГРУНТОВЫЕ ПЛОТИНЫ ►

Плотины и насыпи наиболее уязвимы к фильтрации при определенных гидрологических и гидрогеологических условиях. Среди распространенных проблем, связанных с фильтрацией, которые могут привести к разрушению плотины, можно назвать: суффозию; избыточное поровое/внутреннее давление или водонасыщение; растворение растворимых пород (гипса, известняка, каменной соли); подземную эрозию; чрезмерное фильтрационное противодействие, приводящее к выпору или выбросу грунта [39, 41] (см. рисунок).

#### Суффозия

Суффозия представляет собой форму разрушения грунта, происходящего под воздействием фильтрационных сил. В слабых дисперсных грунтах образуются каналы, по которым частицы выносятся фильтрационными потоками. Эти каналы (полости) со временем расширяются вследствие продолжающегося выноса частиц материала. И, если этот процесс своевременно не

остановить, он может в конечном счете привести к осадкам грунтовой плотины [41, 42].

#### Внутренняя эрозия

Подземная эрозия – еще один распространенный механизм повреждения грунтовых плотин водой. Она вызывается движением воды по трещинам или другим дефектам вдоль границ между дисперсным грунтом и коренными скальными породами [37, 38, 43]. Разрушения из-за подземной эрозии часто обнаруживаются в районах с локальными оползнями, при небрежном строительстве, при наличии трещин и горизонтальной суффозии [37].

#### Растворение

Если основание дамбы сложено растворимыми породами, то их растворение в грунтовых водах может привести к проблемам, связанным с фильтрацией. Дождевые осадки, проникающие сверху, растворяют породы в зонах выше уровня грунтовых вод, а потоки подземных вод – ниже него. Поэтому следует проявлять особую осторожность при строительстве плотин на растворимых грунтах основания, таких как гипс, каменная соль и известняк [37, 38]. Если процессы растворения не контролировать, то это может постепенно привести к потере прочности поверхностных образований.

### **Водонасыщение и поровое/внутреннее давление**

В грунтовом основании плотины, особенно при наличии воды в водохранилище, обычно происходит фильтрация. Среди неблагоприятных последствий фильтрации – избыточное поровое давление и сниженное сопротивление сдвигу [37]. В результате постоянного водонасыщения и связанного с этим деформирования грунтов плотина настолько теряет устойчивость, что уже не может выдерживать напор воды, а это может привести к ее разрушению [37].

### **Фильтрационное противодействие, выпор или выброс грунта**

Среди признаков водонасыщения и чрезмерного порового/внутреннего давления – выпор или выброс грунта. Эти явления происходят в результате избыточного фильтрационного противодействия, то есть когда нижележащий слой оказывает чрезмерное давление на перекрывающий его водоупорный или слабопроницаемый слой в основании плотины. Если поровое давление под водоупорным слоем превышает нагрузку от вышележащих грунтов, происходит повреждение или разрушение плотины. То есть такой сценарий приводит к выпору или выбросу грунта с характерным бурлящим выходом фильтрационного потока (с суффозионным выносом грунтового материала), если вода прорывает или размывает водоупорный слой [37].

## **МЕТОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ►**

### **Методы электроразведки ►**

Такой метод электрических сопротивлений, как электротомография, является неинвазивным геофизическим методом, при котором профили располагаются близко к телу исследуемой плотины параллельно ее оси по верхнему и нижнему бьефу. Он успешно применяется для выявления путей фильтрации в плотинах [12]. Геофизические методы сопротивлений основываются на характерных удельных электрических сопротивлениях материалов и на контрастах между этими сопротивлениями. Сопротивления грунтов определяются

путем пропускания через них электрического тока и измерения возникающих разностей потенциалов между питающими и приемными электродами.

Методы естественного электрического поля (ЕЭП) и вызванной поляризации (ВП) тоже являются проверенными для мониторинга фильтрации в подповерхностном пространстве [12]. Электрические потенциалы, возникающие при движении жидкости, могут быть зафиксированы с помощью профилей наземных наблюдений. Сравнение результатов использования метода ЕЭП/ВП при различных уровнях водохранилища позволяет выявлять траектории фильтрационных потоков.

Однако комбинация методов ЕЭП/ВП и электротомографии позволяет выявлять и уточнять пути фильтрации в плотинах более эффективно [44].

### **Электромагнитный метод ►**

Электромагнитная съемка – это также неинвазивный геофизический метод, широко применяемый для мониторинга фильтрации в плотинах. При его использовании хорошими индикаторами путей фильтрации служат низкие и высокие величины проводимости, возникающие соответственно в пустотах, заполненных воздухом, и в зонах, заполненных водой или глинистыми материалами [44].

Электромагнитный метод можно избирательно применять для сопоставления его результатов с данными по ранее выявленным зонам фильтрации. При его использовании необходимо хорошо понимать гидрогеологические условия исследуемой территории, чтобы можно было корректно обнаруживать линии электроснабжения, подземные кабели, зоны с низкой электропроводностью и слои глин. Следует также принимать во внимание изменения электропроводности воды, возникающие из-за вариаций ее ионного состава и иных характеристик [45].

### **Метод преломленных волн ►**

Метод преломленных волн также используется для мониторинга фильтрации в плотинах, однако довольно редко – из-за необходимости больших за-

трат. Он позволяет получать изображения подповерхностных структур и картировать горизонтальные и вертикальные изменения грунтовых условий на исследуемом участке [46]. Комбинированное применение метода преломленных волн и электротомографии обеспечивает более надежную и информативную оценку путей фильтрации в плотинах и на прилегающих к ним участках.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►**

Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг земляных плотин имеет большое значение для гидротехнических сооружений и других объектов гражданского строительства. В целом, влияние фильтрации на плотины зависит от водоудерживающей способности грунтов, которая является ключевым фактором в инженерной геологии. Инженерные изыскания для проектирования плотин и для их обследования при эксплуатации должны выявлять грунтовые условия, которые могут приводить к аварийным ситуациям из-за фильтрации воды.

Комбинированное использование электротомографии и других методов, таких как метод естественного электрического поля или метод вызванной поляризации, доказало свою эффективность для количественной и качественной оценок фильтрационных потоков. Получение геоэлектрических разрезов методами электротомографии и естественного электрического поля по нескольким профилям, пересекающим участок примыкания плотины к берегу, позволяет реконструировать квазитрехмерную картину фильтрации [44].

И наконец, геофизики, проектировщики и строители должны тесно взаимодействовать при создании и эксплуатации плотин, чтобы избежать повреждений и неоправданных затрат, которые могут возникнуть при отсутствии такого сотрудничества. **И**

*Авторы выражают благодарность руководству Университета «Ковенант» (Нигерия) за оказанную поддержку при подготовке публикации.*

## **ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►**

### **(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►**

Kayode O.T., Odukoya A.M., Adagunodo T.A., Adeniji A.A. Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 173. 2nd International Conference on Science and Sustainable Development. Article 012026. DOI:10.1088/1755-1315/173/1/012026

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►****(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►**

1. Lukman S, Otun S.A, Adie D.B, Ismail A, Oke I.A. A brief assessment of a dam and its failure prevention // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2011. Vol. 11. P. 97–109.
2. Close M.E., Stanton G.J., Pang L. Use of rhodamine WT with XAD7 resin for determining groundwater flow paths // *Journal of Hydrogeology*. 2002. Vol. 10. P. 368–376.
3. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Oladejo O.P., Ojoawo I.A. Vertical electrical sounding to determine fracture distribution at Adumasun area, Oniye, Southwestern Nigeria // *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*. 2013. Vol. 1. № 3. P. 10–22.
4. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Oladejo O.P. Electromagnetic investigation into the cause(s) of road failure along Takie-Ikoyi road. Ogbomosho // *International Journal of Business and Applied Sciences*. 2014. Vol. 1. № 1. P. 78–85.
5. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 1976. 860 p.
6. Creager W.P., Justin J.D., Hinds J. *Engineering for Dams (Vols. I–III)*. New York: John Wiley & Sons, 1945.
7. Wang Q.G., Du Y.H., Su Y., Chen K.Q. Environmental impact post-assessment of dam and reservoir projects: a review // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 13. P. 1439–1443.
8. Lin C.-P., Hung Y.-C., Yu Z.-H., Wu P.-L. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography // *Journal of Geoenvironment*. 2013. Vol. 8. № 2. P. 61–70.
9. Voronkov O.K., Kagan A.A., Krivonogova N.F., Glagovsky V.B., Prokopovich V.S. Geophysical methods and identification of embankment dam parameters // *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. P. 593–599.
10. Okko O., Hassinen P., Korkealaakso J. Location of leakage paths below earth dams by geophysical techniques // *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*, New Delhi, 1994. P. 1349–1352.
11. Abuzeid N. Investigation of channel seepage areas at the existing Kaffrein dam site Jordan using electrical-resistivity measurements // *Journal of Applied Geophysics*. 1994. Vol. 32. P. 163–175.
12. Panthulu T.V., Krishnaiah C., Shirke J.M. Detection of seepage paths in earth dams using self potential and electrical resistivity methods // *Engineering Geology*. 2001. Vol. 59. P. 281–295.
13. Karastathis V.K., Karmis P.N., Drakatos G., Stavrakakis G. Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams, application at the Marathon Dam // *Journal of Applied Geophysics*. 2002. Vol. 50. P. 247–260.
14. Turkmen S., Ozguler E., Taga H., Karaogullarindan T. Seepage problems in the karstic limestone foundation of the Kalecik dam south Turkey // *Engineering Geology*. 2002. Vol. 63. № 3. P. 247–257.
15. Oh Y.C., Jeong H.S., Lee Y.K., Shon H. Safety evaluation of rock-fill dam by seismic (MASW) and resistivity method // *Proceedings of the 16th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2003. P. 1377–1386.
16. Lim H.D., Kim K.S., Kim J.H., Kwon H.S., Oh B.H. Leakage detection of earth dam using geophysical methods // *72th Annual Meeting of the International Commission on Large Dams*, 2004. P. 212–224.
17. Sjudahl P., Dahlin T., Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden // *Environmental Geology*. 2005. Vol. 49. P. 267–273.
18. Song S.H., Song Y.H., Kwon B.D. Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam // *Exploration Geophysics*. 2005. Vol. 36. P. 92–96.
19. Kim J.H., Yi M.J., Song Y., Seol S.J., Kim K.S. Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 2007. Vol. 12. P. 221–235.
20. Cho I.K., Yeom J.Y. Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam // *Geophysics*. 2007. Vol. 72. P. 31–38.
21. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Ojoawo A., Oladejo O.P., Olafisoye E.R. The hydro geophysical investigation of Oyo state industrial estate, Ogbomosho, Southwestern Nigeria, using vertical electrical soundings // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 5. № 5. P. 1816–1829.
22. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Adeniji A.A. Effect of dynamic pattern of the saprolitic zone and its basement on building stability: a case study of a high-rise building in Ogbomosho // *Journal of Applied Physical Science International*. 2015. Vol. 3. № 3. P. 106–115.
23. Adagunodo T.A., Adeniji A.A., Erinle A.V., Akinwumi S.A., Adewoyin O.O., Joel E.S., Kayode O.T. Geophysical investigation into the integrity of a reclaimed open dumpsite for civil engineering purpose // *Interciencia Journal*. 2017. Vol. 42. № 11. P. 324–339.
24. Akinwumi I.I. Soil Modification by the Application of Steel Slag // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2014. Vol. 58. № 4. P. 371–377.
25. Kayode O.T., Akinwumi I.I. Residual soils derived from charnockite and migmatite as road pavement layer materials // *Journal of Materials and Environmental Science*. 2017. Vol. 8. № 2. P. 657–665.

26. Adewoyin O.O., Joshua E.O., Akinyemi M.L., Omeje M., Joe E.S. Application of 2D electrical resistivity imaging and cone penetration test to assess hazardous effect of near surface water on foundations in Lagos, Nigeria // Journal of Physics Conference series. 2017. Vol. 852. № 1. Article 012033.
27. Lin C.-P., Hung Y.-C., Yu Z.-H., Wu P.-L. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography // Journal of Geo- Engineering. 2013. Vol. 8. № 2. P. 61–70.
28. Johansson S., Dahlin T. Seepage monitoring in an earth embankment dam repeated resistivity measurements // European Journal of Environmental and Engineering geophysics. 1996. Vol. 1. P. 229–247.
29. Sjodahl P., Dahlin T., Johansson S. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Rossvation embankment dam test facility in Norway // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2010. Vol. 69. P. 643–658.
30. Ani D.C., Arewa J.O. Electrical resistivity imaging of suspected seepage channels in an earthen dam in Zaria, North-Western Nigeria // Open Journal of Applied Sciences. 2013. Vol. 3. P. 145–154.
31. Alemaw B.F., Keaitse E.O., Chaoka T.R. Management of water supply reservoirs under uncertainties in arid and urbanized environment // Journal of Water Resources and Protection. 2016. Vol. 8. P. 990–1009.
32. Al-Fares W. Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria // Journal of Applied Geophysics. 2011. Vol. 75. № 3. P. 464–471.
33. Al-Fares W. Application of electrical resistivity tomography technique for characterizing leakage problem in Abu Baara earth dam, Syria // International Journal of Geophysics. 2014. Article ID 3681281.
34. Oladapo M.I., Adeoye O., Oluwakemi O., Adebobuyi F.S., Badejo O., Ifarajimi W. Seismic refraction study of Gurara dam phase II, northwestern Nigeria // Journal of Geology and Mining Research. 2013. Vol. 5. № 11. P. 239–249.
35. Minsley B.J., Burton B.L., Ikard S.J., Powers M. Hydrogeophysical investigations at Hidden dam, Raymond, California // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2011. Vol. 16. № 4. P. 145–164.
36. Sjodahl P., Dahlin T., Johansson S. Embankment dam seepage evaluation from resistivity monitoring data // Near Surface Geophysics. 2009. Vol. 7. № 5-6. P. 463–474.
37. Training Aids for Dam Safety: Evaluation of Seepage Conditions. Denver, Colorado, U.S.: Bureau of Reclamation, 2000.
38. Flores-Berrones R., Ramirez-Reynaga M. and Macari E.J. Internal erosion and rehabilitation of an earth dam // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2011. Vol. 137. № 2. P. 150–160.
39. Omofunmi E.O., Kolo J.G., Oladipo A.S., Diabana P.D., Ojo A.S. A review on effects and control of seepage through earth-fill dams // Current Journal of Applied Science and Technology. 2017. Vol. 22. № 5. P. 1–11.
40. Auvinet G., Lopez-Acosta N. P. Rapid drawdown condition in submerged slopes // 15 Presentations of Friends and Colleagues in Tribute to Eng. Jess Alberro Aramburu. Mexico City, Mexico: Instituto de Ingeniería (UNAM) & Mexican Society of Geotechnical Engineering (SMIG), 2010. P. 167–189. ISBN 978-607-02-0866-9.
41. Alberro J. Efecto de los flujos transitorios en el comportamiento de las estructuras de tierra: 18th Nabor Carrillo Lecture. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG), Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico, 2006. [Effect of transient flows on the behaviour of earth structures: 8th Nabor Carrillo Lecture, Mexican society of geotechnical engineering SMIG, Tuxtla Gutierrez, Chiapas Mexico, 2006 (in Spanish)].
42. Wang Y., Li C., Zhou X., Wei X. Seepage piping evolution characteristics in Bim soil – an environmental study // Water. 2017. Vol. 9. № 458. P. 1–18.
43. Fell R., Wan C., Foster M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. Vol. 129. № 4. Article 307.
44. Brosten T.R., Llopis J.L., Kelley J.R. Using Geophysics to Assess the Condition of Small Embankment Dams: ERDC/GSL TR-05-17. Vicksburg, Mississippi, US: US Army Corps of Engineers Research and Development Center, 2005.
45. Montgomery J.R., Kofoed V.O. Mapping, tracking, and monitoring flow paths through earthen dams // Dam Safety 2001: the 18th annual conference of the Association of State Dam Safety Officials, held September 9–13, 2001, in Snowbird, Utah, USA. Lexington, Kentucky, USA: Association of State Dam Safety Officials, 2001.
46. Mustafa S.R., Ibrahim E.H., Elawadi E., Metwaly M., Agami N.A. Seismic refraction and resistivity imaging for assessment of groundwater seepage under a dam site, southwest of Saudi Arabia // International Journal of the Physical Sciences. 2012. Vol. 7. № 48. P. 6230–6239.

