

Код МРНТИ 36.23.31

Н. Ф. Низаметдинов¹, А. Б. Рахатова², З. Ж. Маматкулов³, *М. Б. Игемберлина¹¹НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан),²НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина»

(г. Астана, Казахстан),

³Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства

(г. Ташкент, Узбекистан)

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. В статье представлен практический опыт использования автоматизированной системы геомониторинга за деформационными процессами насыпных оградительных дамб Николаевской обогатительной фабрики. Оценка пространственного положения сооружений реализуется посредством высокоточного отслеживания координат контрольных реперов, оснащенных оптическими отражателями, установленные по профильным линиям в теле дамбы. В качестве измерительных станций выступают опорные пилоны, на которых установлены роботизированные электронные тахеометры. Математическая обработка результатов смещений тела получаемого массива данных осуществляется в программной среде Leica GeoMoS. На основе полученных эмпирических данных подтверждается сохранение устойчивости и общей эксплуатационной надежности ограждающих дамб обогатительной фабрики.

Ключевые слова: насыпная дамба, автоматизированный геомониторинг, деформационная марка, опорный пилон, роботизированный тахеометр, сравнительный анализ, пространственные смещения, программное обеспечение GeoMoS.

Аспаптық бақылау негізінде байыту фабрикаларының қоршау бөгеттерінің жағдайын бағалау

Аннотация. Мақалада Николаев байыту фабрикасының үйінді қоршау бөгеттерінің деформациялық процестеріне арналған автоматтандырылған геомониторинг жүйесін қолданудың практикалық тәжірибесі келтірілген. Құрылыстардың кеңістіктік жағдайын бағалау бөгет денесінде бейінді сызықтар бойынша орнатылған оптикалық шағылыстырғыштармен жабдықталған бақылау реперлерінің координаттарын жоғары дәлдікпен қадағалау арқылы іске асырылады. Өлшеу станциялары роботталған электронды тахеометрлер орнатылған тірек пилондары болып табылады. Алынған мәліметтер массивінің дене жылжулары нәтижелерін математикалық өңдеу Leica GeoMoS бағдарламалық ортасында жүзеге асырылады. Алынған эмпирикалық деректер негізінде байыту фабрикасының қоршау бөгеттерінің тұрақтылығы мен жалпы пайдалану сенімділігінің сақталуы расталады.

Түйінді сөздер: үйінді бөгеті, автоматтандырылған геомониторинг, деформациялық маркасы, тірек пилон, роботталған тахеометр, салыстырмалы талдау, кеңістіктік жылжулар, GeoMoS бағдарламалық қамтамасыз ету.

Assessment of the condition of the enclosing dams of processing plants based on instrumental control

Abstract. The article presents the practical experience of using an automated geomonitoring system for the deformation processes of bulk barrier dams of the Nikolaevskaya processing plant. The spatial position of the structures is estimated by means of high-precision tracking of the coordinates of control reference points equipped with optical reflectors installed along profile lines in the body of the dam. The measuring stations are support pylons on which robotic electronic total stations are installed. Mathematical processing of the results of body displacements of the received data array is carried out in the Leica GeoMoS software environment. Based on the empirical data obtained, the preservation of the stability and overall operational reliability of the enclosing dams of the enrichment plant is confirmed.

Key words: bulk dam, automated geomonitoring, deformation mark, support pylon, robotic total station, comparative analysis, spatial displacements, GeoMoS software.

Введение

Обеспечение эксплуатационной надежности и экологической безопасности оградительных дамб хвостохранилищ горнодобывающих предприятий требует непрерывного геомеханического контроля. Первоначальные инженерно-геологические расчеты устойчивости откосных сооружений нуждаются в обязательном фактическом подтверждении посредством высокоточных геодезических наблюдений, позволяющих своевременно локализовать ослабленные участки основания и тела дамбы [1].

По результатам предыдущих исследований выполненный комплексный пространственно-временной анализ результатов инструментальных измерений, полученный автоматизированной системой за эксплуатационный период, позволяет не только оценить деформирования откосов дамбы и проверить первоначальные проектные решения, но и выполнить достоверный прогноз развития смещений. Выявление характера деформационных процессов до момента достижения ими критических значений предоставляет возможность своевременно разработать комплекс мер по стабилизации дамбы.

Целью настоящей работы является переход от этапа конструирования и внедрения наблюдательной сети к пространственно-временному анализу. Исследование на-

правлено на комплексное сравнение сдвижений и деформаций тела дамбы за период с 2023 по 2026 годы. Пространственно-временной анализ накопленных данных позволяет не только оценить текущую динамику сдвижения тела дамбы, но и спрогнозировать дальнейший тренд геомеханического поведения дамбы. Выявление деформационных процессов до момента достижения им критических значений предоставляет возможность своевременно разработать и внедрить инженерные мероприятия по стабилизации локальных участков оградительной дамбы [2, 3, 4].

Методы исследований

Методика автоматизированного инструментального контроля заключается в непрерывном сборе электронным тахеометром и дистанционной передаче, а затем анализе геотехнических и экологических данных в режиме реального времени с использованием современных технологий, специализированных программ наблюдений и дистанционного зондирования, что позволяет выявлять скрытые угрозы [5].

Суть реализованной методики сводится к последовательной реализации следующего комплекса измерительных-аналитических процедур:

- пространственно-координатная фиксация положения заложённых реперов с периодической высокоточной регистрации трехмерных координат (X, Y, H) сети контрольных деформационных реперов на теле оградительной дамбы по заложённым профильным линиям перпендикулярно простирацию откоса;
- обеспечение стабильного базиса со строгой привязкой всех измерительных серий к абсолютно неподвижной опорной геодезической сети (пилонам), вынесённой за контуры зон потенциальных смещений грунтового массива;
- автоматизация измерительного процесса с использованием роботизированных электронных тахеометров для дистанционного сбора эмпирических данных в автоматическом режиме согласно заданному временному регламенту;
- компенсация влияния среды, повышение точности работы дальномера за счет систематического учета текущих атмосферных условий (температуры, влажности и давления) для повышения точности работы дальномера и внесения соответствующих математических поправок перед каждой серией наблюдений;
- геокинематический анализ путем математического сопоставления пространственных координат текущих эпох наблюдения с исходным (нулевым) циклом для вычисления векторов абсолютных и относительных смещений, а также определения скоростей деформирования тела дамбы.

Надежное прогнозирование состояния откосов тел дамб предлагается осуществлять путем внедрения системы автоматизированного контроля, основанной на использовании роботизированного электронного тахеометра, установленного на стационарном пилоне в специальном контейнере, расположенном вне зоны возможных деформаций, и рабочих металлических реперов с оптическими мониторинговыми отражателями, заложёнными непосредственно в теле дамбы на наиболее опасных направлениях возможного деформирования [5].

На Николаевской дамбе наблюдения ведутся по десяти профильным линиям с наличием сорока металлических реперов с оптическими отражателями с каждой стороны (восточной – 40 шт. и западной – 40 шт.) и по одному ориентирному пилону с оптическим отражателем с восточной и западной стороны [5].

Автоматизированная система мониторинга оградительных дамб хвостохранилища состоит из двух опорных пилонов с роботизированными электронными тахеометрами, двух ориентирных пилонов с круглыми призмами, сорока мониторинговых реперов с призмами и одного центра управления.

Для организации инструментальных наблюдений на оградительных дамбах хвостохранилища, опираясь на передовые международные стандарты и руководства по геомеханическому мониторингу объектов размещения отходов обогащения [6], необходимо выполнить следующее:

- выбрать потенциально неустойчивые или оползневые участки на основе анализа инженерно-геологических и горнотехнических условий разработки для определения мест закладки реперов профильных линий;
- разработать проекты наблюдательных станций за деформациями откосов бортов карьеров и отвалов;

- вынести проекты наблюдательных станций в натуру и заложить репера;
- осуществить привязку исходных и опорных реперов (определение координат X, Y, Z) к ближайшим пунктам маркшейдерской опорной геодезической сети;
- произвести инструментальные наблюдения по реперам профильных линий наблюдательных станций;
- осуществить обработку результатов инструментальных наблюдений и произвести их анализ [7].

Опорный пункт № 2 располагается у основания южной части оградительной дамбы хвостохранилища (рис. 1).

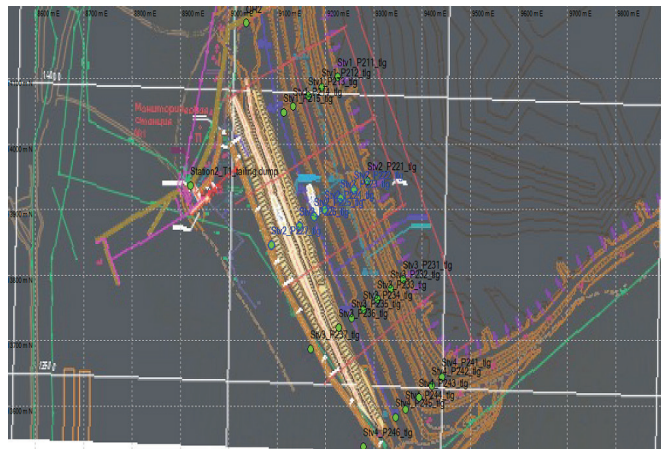


Рис. 1. Схема мониторинга автоматизированной системы GeoMoS на Николаевской дамбе.

Сурет 1. Николаев бөгетіндегі GeoMoS автоматтандырылған жүйесінің мониторингтік схемасы.

Figure 1. Automated system monitoring scheme GeoMoS at Nikolaevskaya dam.

С мониторинговой станции № 2 планируется вести наблюдения по профильным линиям № 6–9 с использованием высокоточного электронного тахеометра, установленного на твердом пункте Station2_T1, помещенного в мониторинговую кабину. Ориентирный пункт № 2 для электронного тахеометра находится на расстоянии 200 метров в прямой видимости и является пунктом OR2. Призмы устанавливаются на бермах по профильным линиям в количестве 25 штук, максимальная дальность измерений 700 метров [8, 9].

Данная система наблюдений позволит дать качественную и полную оценку состояния устойчивости откосов хвостохранилища и вовремя наметить мероприятия по устранению причин развития деформаций [10]. Система передачи данных измерительного комплекса обеспечивает возможность удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой в автономном режиме, вне зависимости от пространственной удаленности узла обработки данных (рис. 2).

Функционирование системы по заданным алгоритмам не только гарантирует высокую оперативность проведения измерительных серий, но и полностью нивелирует погрешности, обусловленные субъективным (человеческим) фактором. Промежутки между циклами измерений могут составлять от нескольких минут или часов. Систематиче-



Рис. 2. Автоматизированная система с мониторинговой кабиной и ПО GeoMos.

Сурет 2. Мониторингтік кабинасы және GeoMos БҚ бар автоматтандырылған жүйе.

Figure 2. Automated system with monitoring cabin and GeoMos software.

ская актуализация пространственных параметров дамбы формирует надежную аналитическую базу для высокоточного прогнозирования его геомеханического состояния, что является критически важным инструментом для предотвращения возможных аварийных ситуаций [10, 11]. Информационно-вычислительным ядром системы выступает специализированное программное обеспечение, состоящее из двух ключевых сегментов: модуль автоматизированной регистрации эмпирических данных и подсистему их последующей математической обработки [12].

Аналитической обработке может подвергаться как весь массив накопленной измерительной информации, так и отдельные их сегменты, выделенные за определенные хронологические периоды. Использование данных наблюдений, сформированных в ходе геомониторинга, позволяет с высокой точностью идентифицировать как краткосрочные деформационные сдвиги, так и кинематические тренды. Результаты подобного комплексного анализа служат надежной основой для объективной оценки текущего эксплуатационного состояния оградительной дамбы и разработки прогнозной модели ее геомеханического поведения. Дополнительным преимуществом автоматизированного комплекса является функция непрерывного контроля безопасности: непосредственно в процессе сбора информации система способна в режиме реального времени заранее предупреждать о критических смещениях контрольных реперов [12].

Математическая обработка, а также накопление и объединение данных осуществляются с помощью ПО GeoMos. Данная среда позволяет наглядно визуализировать полученные значения, выстраивая графики продольных, поперечных и вертикальных сдвижений, а также формируя значения планово-высотных смещений.

Результаты

На основе сопоставления результатов инструментальных наблюдений за период 2023–2026 гг. выполнен анализ

динамики пространственных смещений. Необходимо подчеркнуть, что для построения графиков использовались репера, которые изображены на рис. 2 по участку профиля № 2. Графическая интерпретация вычисленных скоростей смещений для этих реперов представлена на рис. 3, 4, 5.

На рис. 3 представлен график продольных смещений (*Longitudinal Displacement*) деформационных реперов (Stv2_P222_tlg – Stv2_P227_tlg), установленных в теле насыпной дамбы. Данные получены на основе непрерывного автоматизированного мониторинга в ПО Leica GeoMos и охватывают период наблюдений с апреля 2023 года по февраль 2026 года. Представленные временные ряды прошли процедуру сглаживания (*smoothed*) для фильтрации аппаратного шума и выделения полезного сигнала.

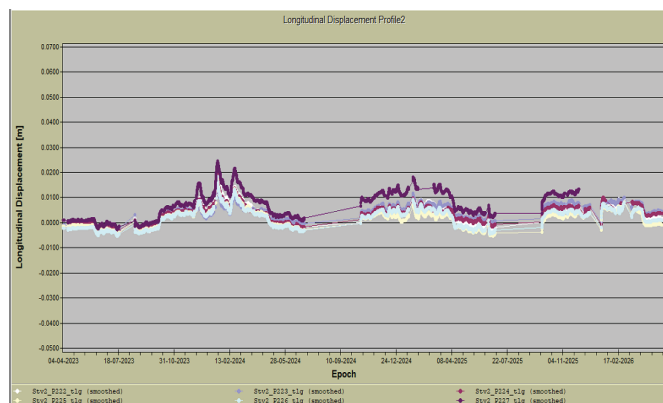


Рис. 3. График величин продольных смещений деформационных реперов на дамбе.

Сурет 3. Бөгеттегі деформациялық реперлердің бойлық жылжулар шамаларының графигі.

Figure 3. Graph of the longitudinal displacements of the deformation reference points on the dam.

При этом анализ графиков демонстрирует высокую степень корреляции в поведении всех наблюдаемых реперов. Синхронность колебаний свидетельствует о том, что рассматриваемый участок насыпной дамбы испытывает комплексные, системные деформации тела насыпи, а не локальные сдвиги отдельных элементов. Наблюдается ярко выраженный циклический характер смещений тела дамбы, который напрямую коррелирует с сезонными факторами. Особый интерес представляет сравнение деформационных циклов за 2024 и 2025 годы:

- цикл 2024 года: в первой половине года (февраль – апрель) зафиксирован абсолютный максимум продольных смещений за весь период наблюдений, где наибольшие значения демонстрирует репер Stv2_P227_tlg, достигнув пиковой отметки порядка 0.025 м (25 мм);

- цикл 2025 года: в аналогичный весенний период 2025 года также наблюдается повышение значений смещений (до 0.015 – 0.018 м), однако амплитуда смещений заметно ниже по сравнению с 2024 годом. Данное снижение амплитуды может свидетельствовать о продолжающемся процессе уплотнения грунтов насыпи, либо о различиях в эксплуатационных нагрузках на тело дамбы в эти годы.

Отмечается четкая неравномерность величин смещений между различными реперами:

- репер *Stv2_P227_tlg* стабильно показывает наибольшую амплитуду деформаций, указывающую на расположение зоны максимального динамического воздействия (вероятно, в центральной части гребня или в зоне максимальной мощности насыпи);

- реперы *Stv2_P222_tlg* и *Stv2_P226_tlg* демонстрируют минимальные отклонения, колеблющиеся в пределах от -0.005 м до 0.010 м, что характерно для более стабильных участков дамбы, таких как примыкания к приоткасной зоне дамбы.

Накопления прогрессирующих пластических (необратимых) деформаций, способных привести к нарушению общей устойчивости дамбы, за анализируемый период не выявлено. Состояние насыпной дамбы в зоне контроля профиля можно охарактеризовать как стабильно-рабочее.

Наряду с анализом продольных смещений, комплексная оценка состояния дамбы требует рассмотрения динамики высотных деформаций (осадок). На следующем графике представлены аналогичный период наблюдений вертикальных смещений (*Height Displacement*) для той же группы марок профиля № 2 (*Stv2-P222-tlg – Stv2-P227-tlg*) (рис. 4).

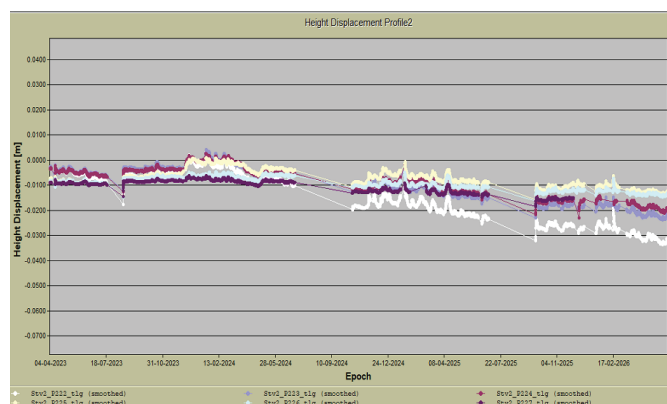


Рис. 4. График оседаний деформационных реперов.
Сурет 4. Деформациялық реперлердің шөгу графигі.
Figure 4. Graph of subsidence of deformation reference points.

График высотных деформаций (оседаний) демонстрирует четкий долгосрочный тренд, направленный в отрицательную область. Это является отражением процесса уплотнения грунтов в теле дамбы. В начальном периоде наблюдений до середины 2024 года, осадки были относительно стабильны. В весенний период 2024 года, синхронно с зафиксированным ранее пиком продольных смещений, на графике оседаний отмечается локальное «подняtie» реперов, который показывает отметку до $+0.005$ м. Указанный эффект объясняется паводковым гидростатическим подпором либо морозным пучением грунта. Однако со второй половины 2024 по 2025 год влияние сезонных факторов нивелируется, и фиксируется стабильная равномерная осадка всех контрольных марок.

В период 2025–2026 гг. выявлена пространственная неравномерность высотных деформаций. Если основная группа марок, включая *Stv2-P227-tlg*, стабилизировалась на отметках от -0.010 до -0.020 м, то осадка репера *Stv2-P222-tlg* достигла максимума -0.03 – -0.035 м. Это указывает на локальную сжимаемость грунтов или повышенную статическую нагрузку в зоне его установки. Зафиксированный перепад высот в 0.015 – 0.02 м является допустимым на текущем этапе эксплуатации и подтверждает уплотнение массива. Тем не менее, для контроля перераспределения внутренних напряжений необходим дальнейший непрерывный мониторинг сооружения.

Для объективной оценки и получения полной картины пространственно-деформационного состояния дамбы рассмотрены поперечные смещения (*Transverse Displacement*), их динамика отражена на графике 3 (рис. 5).

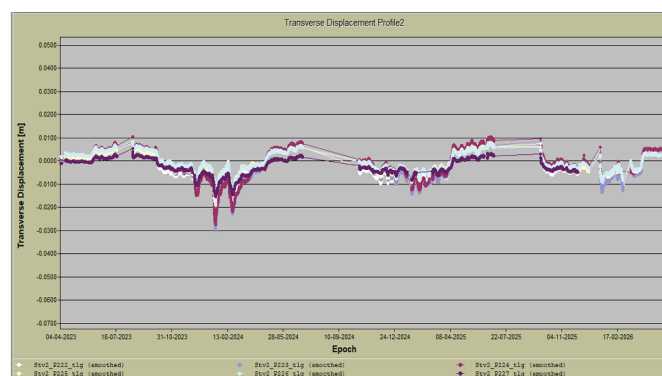


Рис. 5. График поперечных смещений деформационных реперов.
Сурет 5. Деформациялық реперлердің көлденең жылжулар графигі.
Figure 5. Graph of transverse displacements of deformation reference points.

График поперечных смещений, так же, как и график продольных (рис. 3) демонстрирует ярко выраженный циклический характер, зависящий от сезонных факторов. Однако амплитуда и направленность этих движений имеют свои особенности.

Пиковые нагрузки 2024 года: в зимне-весенний период 2024 года (январь – март) наблюдается резкое отклонение марок в отрицательную область. Максимальные значения фиксируются у реперов *Stv2_P223_tlg* и *Stv2_P224_tlg*, достигая отметки -0.030 м (30 мм). Важно отметить, что этот всплеск поперечных смещений совпадает по времени с максимумом продольных деформаций (до 25 мм), зафиксированным на первом графике (рис. 3). Это свидетельствует о том, что в данный период тело дамбы испытало наибольшее пространственное (диагональное) смещение, вероятнее всего, под воздействием максимального давления со стороны хвостохранилища.

Снижение активности в 2025 году: в аналогичный сезон 2025 года поперечные смещения также уходят в отрицательную зону, однако их максимальная амплитуда снижается ровно в два раза – до -0.015 м (15 мм). Эта тенденция полностью зеркально отражает поведение продольных

смещений, где в 2025 году также наблюдалось снижение деформационной активности.

В летне-осенний периоды графики поперечных смещений возвращаются к околонулевым или слабоположительным отметкам (до +0,010 м), что подтверждает упругий характер работы сооружения в горизонтальной плоскости.

Заключение

На основе трехлетнего мониторинга продольных, поперечных и высотных деформаций сделаны следующие выводы о состоянии насыпной дамбы по профильной линии № 2:

- разделение деформационных процессов: поведение насыпной дамбы определяется двумя факторами. Первый – постоянная вертикальная осадка вследствие естественного уплотнения грунтов. Второй – упругие горизонтальные смещения (продольные и поперечные), имеющие сезонный характер и зависящие от уровня воды в хвостохранилище и перепадов температур;

- сравнительная оценка периодов наблюдения: 2024 год характеризовался наибольшими динамическими воздействиями. Весной зафиксированы максимумы продольных (до 0,025 м) и поперечных (до -0,030 м) смещений при локальном замедлении процесса консолидации грунта. В 2025 году горизонтальные смещения стабилизировались (амплитуда снизилась почти в два раза) на фоне равномерного уплотнения отсыпанных пород;

- неравномерность распределения нагрузок: комплексный мониторинг выявил, что различные участки профиля по-разному реагируют на нагрузки. Реперы центральной группы (P223, P224, P227) наиболее подвержены сезонным горизонтальным сдвигам (продольным и поперечным). В то же время репер P222 выделяется наибольшей интенсивностью вертикальной усадки отсыпных пород (до -35 мм к 2026 году);

- оценка устойчивости дамбы: несмотря на зафиксированные колебания и локальные отклонения в высотных смещениях отдельных реперов, деформации носят прогнозируемый и преимущественно затухающий характер. Накопления критических, необратимых сдвигов, способных привести к разрушению тела дамбы, за анализируемый период с 2023 по 2026 год, не выявлено. Оградительная дамба функционирует в штатном режиме, однако выявленная специфика осадки отдельных реперов (в частности, P222) требует продолжения непрерывных автоматизированных геодезических наблюдений.

Выводы

Совместный анализ трех компонентов смещений (продольных, высотных и поперечных) позволяет сделать следующие обоснованные выводы о состоянии насыпной дамбы на участке профиля № 2:

1. Совместный анализ смещений выделил два физических процесса в теле дамбы: постоянную вертикальную усадку (уплотнение отсыпанных пород) и сезонные упругие горизонтальные колебания, интенсивность которых напрямую зависит от изменения уровня воды в хвостохранилище и перепадов температур. Согласно сравнительной оценке, максимум динамических нагрузок на сооружение зафиксирован весной 2024 года: пиковые горизонтальные сдвиги (до 0,025 м продольно и -0,030 м поперечно) сопровождались замедлением усадки и к 2025 году процесс стабилизировался, показав, что горизонтальные смещения уменьшились в два раза при равномерном уплотнении массива.

2. В ходе исследования установлена выраженная пространственная неравномерность распределения деформационных нагрузок. Наибольшая чувствительность к сезонным колебаниям характерна для контрольных марок центральной группы (P223, P224, P227), тогда как максимальная интенсивность вертикальной осадки локализована в зоне репера P222, где значения к 2026 году достигли отметки -0,035 м.

Резюмируя полученные данные, можно утверждать, что зафиксированные деформации носят прогнозируемый и преимущественно затухающий характер. Аккумуляции критических, необратимых сдвигов, способных спровоцировать разрушение тела дамбы, за весь анализируемый период не выявлено. В настоящее время оградительная дамба сохраняет общую эксплуатационную надежность и функционирует в штатном режиме. Вместе с тем, выявленная специфика геомеханического поведения локальных участков (в частности, аномалии осадки марки P222) подтверждает абсолютную необходимость продолжения непрерывного автоматизированного геомониторинга для своевременной разработки предупредительных инженерных мероприятий.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам ТОО «Геобизнес» и профессорско-преподавательскому составу кафедры МДиГ НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» за помощь и советы по написанию данной статьи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Низаметдинов Ф. К., Долгоносков В. Н., Бесимбаева О. Г. Устойчивость насыпных дамб и гидротехнических сооружений. – Караганда: КарГТУ, 2013. – 208 с. (на русском языке)
2. Построение зависимостей параметров предельного откоса дамб хвостохранилищ МОФ АГМК при помощи программного обеспечения / С. С. Сайидкасимов [и др.] // Горный вестник Узбекистана. – 2020. – № 4 (83). – С. 78–82 (на русском языке)
3. Инструментальный контроль устойчивости рудных отвалов на площадке кучного выщелачивания / Ф. К. Низаметдинов [и др.] // Горный журнал. – 2022. – № 2. – С. 19–23 (на русском языке)
4. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Утв. Комитетом по государственному контролю за чрезвычайными ситуациями и промышленной безопасностью Республики Казахстан № 39 от 22 сентября 2008 г. – 75 с. (на русском языке)

5. Дистанционный надзор за состоянием устойчивости оградительных дамб обогатительных фабрик / Н. Ф. Низаметдинов [и др.] // Горный журнал Казахстана. – 2024. – № 3 (227). – С. 17–23 (на русском языке)
6. Обзор руководящих принципов и систем мониторинга безопасности хвостохранилищ / Masoud Zare [и др.] // (MDPI) Minerals. – 2024. – № 14. – С. 1–28 (на английском языке)
7. Система мониторинга стабильности хвостохранилища с использованием передовых методов анализа больших данных на примере объекта «Железный Мост» / Wioletta Koperska [и др.] // Archives of Civil Engineering. – 2022. – Т. 68 (2). – С. 297–311 (на английском языке)
8. Система автоматизированного контроля состояния насыпных дамб хвостохранилищ обогатительных фабрик / Н. Ф. Низаметдинов [и др.] // Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 63–67 (на русском языке)
9. Ханнанов Р. Р., Алданыш Ж., Михнев А. В. Мониторинг за состоянием гидротехнических сооружений // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2020. – № 7–4. – С. 76–83 (на казахском языке)
10. Coulibaly Yaya, Belem Tikou, Cheng LiZhen. Численный анализ и геофизический мониторинг для оценки устойчивости дамбы хвостохранилища «Северо-Запад» на шахте Вествуд // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – Т. 27. – № 4. – С. 701–710 (на английском языке)
11. Улучшение управления рисками хвостохранилищ с помощью трехмерной характеристики методом электротомографии сопротивлений: пример объекта в штате Сан-Паулу, Бразилия / L. A. Oliveira [и др.] // Journal of Applied Geophysics. – 2023. – Т. 210. – Ст. 104924 (на английском языке)
12. Joseph Mwanza, Peter Mashumba, Arnesh Telukdarie. Методология мониторинга устойчивости хвостохранилищ в режиме реального времени с использованием моделирования с помощью цифровых двойников и машинного обучения // Procedia Computer Science. – 2024. – Т. 232. – С. 2279–2288 (на английском языке)

ПАЙДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Низаметдинов Ф. К., Долгоносков В. Н., Бесимбаева О. Г. Үйінді бөгеттер мен гидротехникалық құрылыстардың тұрақтылығы. – Қарағанды: ҚарМТУ, 2013. – 208 б. (орыс тілінде)
2. Бағдарламалық қамтамасыз етудің көмегімен бөгеттердің қалдық қоймаларының МОФ АГМК шекті еңіс параметрлерінің тәуелділіктерін құру / С. С. Сайидкасимов [және т. б.] // Өзбекстанның тау-кен жаршысы. – 2020. – № 4 (83). – Б. 78–82 (орыс тілінде)
3. Үймелі шаймалау алаңындағы кен үйінділерінің тұрақтылығын аспаптық бақылау / Ф. К. Низаметдинов [және т. б.] // Тау-кен журналы. – 2022. – № 2. – Б. 19–23 (орыс тілінде)
4. Ашық кеніштегі жағдаулардың, кемерлер қиябеттері мен үйінділердің деформацияларын бақылау және олардың тұрақтылығын қамтамасыз ету жөніндегі іс-шараларды әзірлеу бойынша әдістемелік нұсқаулар. – Қазақстан Республикасы Төтенше жағдайлар және өнеркәсіптік қауіпсіздікті мемлекеттік бақылау комитетінің 2008 жылғы 22 қыркүйектегі № 39 бұйрығымен бекітілген. – 75 б. (орыс тілінде)
5. Байыту фабрикаларының қоршау бөгеттерінің тұрақтылығын қашықтықтан қадағалау / Н. Ф. Низаметдинов [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен жаршысы. – 2024. – № 3 (227). – Б. 17–23 (орыс тілінде)
6. Қалдық қоймаларының қауіпсіздігін бақылау нұсқаулары мен жүйелеріне шолу / Masoud Zare [және т. б.] // (MDPI) Minerals. – 2024. – № 14. – Б. 1–28 (ағылшын тілінде)
7. «Темір көпір» объектісінің мысалында үлкен деректерді талдаудың озық әдістерін қолдана отырып, қалдық қоймасының тұрақтылығын бақылау жүйесі / Wioletta Koperska [және т. б.] // Archives of Civil Engineering. – 2022. – Т. 68 (2). – Б. 297–311 (ағылшын тілінде)
8. Үйінді бөгеттердің қалдық қоймаларының байыту фабрикаларының жағдайын автоматтандырылған бақылау жүйесі / Н. Ф. Низаметдинов [және т. б.] // Тау-кен журналы. – 2023. – № 2. – Б. 63–67 (орыс тілінде)
9. Ханнанов Р. Р., Алданыш Ж., Михнев А. В. Гидротехникалық құрылыстардың жай-күйіне мониторинг жүргізу // Қазіргі әлемдегі өзекті ғылыми зерттеулер. – 2020. – № 7–4. – Б. 76–83 (қазақ тілінде)
10. Coulibaly Yaya, Belem Tikou, Cheng LiZhen. Вествуд шахтасындағы «Солтүстік-Батыс» қалдық қоймасы бөгетінің тұрақтылығын бағалау үшін сандық талдау және геофизикалық мониторинг // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – Т. 27. – № 4. – Б. 701–710 (ағылшын тілінде)
11. Резистивтік томография әдістемесінен 3d сипаттамасы бойынша қалдық қоймаларының тәуекелдерін басқаруды жақсарту: Сан-Паулу Бразилиядағы жағдайды зерттеу / L. A. Oliveira [және т. б.] // Journal of Applied Geophysics. – 2023. – Б. 210 (ағылшын тілінде)
12. Joseph Mwanza, Peter Mashumba, Arnesh Telukdarie. Цифрлық егіз модельдеуді және машиналық оқытуды қолдана отырып, нақты уақыт режимінде қалдық қоймаларының тұрақтылығын бақылауға арналған негіз // Procedia Computer Science. – 2024. – Т. 232. – Б. 2277–2288 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Nizametdinov F. K., Dolgonosov V. N., Besimbayeva O. G. Ustoichivost' nasypnykh damb i gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Stability of bulk dams and hydraulic structures]. – Karaganda: KarGTU, 2013. – 208 p. (in Russian)
2. Postroenie zavisimostei parametrov predel'nogo otkosa damb khvostokhranilishch MOF AGMK pri pomoshchi programnogo obespecheniya [Building dependencies of the parameters of the marginal slope of the dams

- of the MOF AGMK with the help of software] S. S. Sayidkasimov et al. *Gornyi vestnik Uzbekistana [Mining Bulletin of Uzbekistan]*. – 2020. – No. 4 (83). – P. 78–82 (in Russian)
3. Instrumental'nyi kontrol' ustoichivosti rudnykh otvalov na ploshchadke kuchnogo vyshchelachivaniya [Instrumental stability control of ore dumps at the heap leaching site] F. K. Nizametdinov et al. *Gornyi zhurnal [Mining Journal]*. – 2022. – No. 2. – P. 19–23 (in Russian)
 4. Metodicheskie ukazaniya po nablyudeniym za deformatsiyami bortov, otkosov ustupov i otvalov na kar'erakh i razrabotke meropriyatiy po obespecheniyu ikh ustoichivosti [Guidelines for Monitoring Deformations of Pit Walls, Bench Slopes and Dumps at Open-Pit Mines and for Developing Measures to Ensure Their Stability]. Approved by the Committee for State Control over Emergencies and Industrial Safety of the Republic of Kazakhstan, No. 39, September 22, 2008. 75 p. (in Russian)
 5. Dstantsionnyi nadzor za sostoyaniem ustoichivosti ograditel'nykh damb obogatitel'nykh fabrik [Remote monitoring of the stability of the protection dams of processing plants] N. F. Nizametdinov et al. *Gornyi zhurnal Kazakhstan [Mining Journal of Kazakhstan]*. – 2024. – No. 3 (227). – P. 17–23 (in Russian)
 6. A Review of Tailings Dam Safety Monitoring Guidelines and Systems / Masoud Zare et al. // (MDPI) *Minerals*. – 2024. – No. 14. – P. 1–28 (in English)
 7. The Tailings Storage Facility (TSF) stability monitoring system using advanced big data analytics on the example of the Želazny Most Facility / Wioletta Koperska et al. // *Archives of Civil Engineering*. – 2022. – Vol. 68 (2). – P. 297–311 (in English)
 8. Sistema avtomatizirovannogo kontrolya sostoyaniya nasypanykh damb khvostokhranilishch obogatitel'nykh fabrik [Automated control system for the condition of bulk dams of tailings dumps and processing plants] N. F. Nizametdinov et al. *Gornyi zhurnal [Mining Journal]*. – 2023. – No. 2. – P. 63–68 (in Russian)
 9. Khannanov R. R., Aldanysh J., Mikhnev A. V. Monitoring of the condition of hydraulic structures // *Current scientific research in the modern world*. – 2020. – No. 7–4. – P. 76–83 (in Kazakh)
 10. Coulibaly Yaya, Belem Tikou, Cheng LiZhen. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailing dam at Westwood Mine // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. – Issue 4. – P. 701–710 (in English)
 11. Improving tailings dam risk management by 3D characterization from resistivity tomography technique: Case study in São Paulo – Brazil / L. A. Oliveira et al. // *Journal of Applied Geophysics*. – 2023. – Vol. 210. – Article 104924 (in English)
 12. Joseph Mwanza, Peter Mashumba, Arnesh Telukdarie. A Framework for Monitoring Stability of Tailings Dams in Realtime Using Digital Twin Simulation and Machine Learning // *Procedia Computer Science*. – 2024. – Vol. 232. – P. 2277–2288 (in English)

Сведения об авторах:

Низаметдинов Н. Ф., к. т. н., ассоциированный профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), leica@geobusiness.kz; <https://orcid.org/0000-0002-8881-1259>

Рахатова А. Б., м. т. н., докторант ГОП «Геодезия и картография», НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина» (г. Астана, Казахстан), I-aliya-rahatova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9086-232X>

Маматкулов З. Ж., доктор Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Государственный кадастр», Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства (г. Ташкент, Узбекистан), z.mamatkulov@tiiame.uz; <https://orcid.org/0000-0001-9853-856X>

Игемберлина М. Б., доктор Ph.D, и. о. доцента кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), igemberlina@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4243-7748>

Авторлар туралы мәліметтер:

Низаметдинов Н. Ф., т. ғ. к., «Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті», «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

Рахатова А. Б., т. ғ. м., С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, «Геодезия және картография» ББТ докторанты (Астана қ., Қазақстан)

Маматкулов З. Ж., Ph.D докторы, Ташкент ауыл шаруашылығын суару және механикаландыру инженерлері институты, «Мемлекеттік кадастр» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Ташкент қ., Өзбекстан)

Игемберлина М. Б., Ph.D докторы, «Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті», «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Nizametdinov N. F., Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Surveying and Geodesy, NAO «Karaganda Technical University named after A. Saginov» (Karaganda, Kazakhstan)

Rakhatova A. B., Master of Technical Sciences, doctoral student at the Department of Geodesy and Cartography, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin (Astana, Kazakhstan)

Mamatkulov Z. Zh., Doctor of PhD, Associate Professor of the Department of State cadastre, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (Tashkent, Uzbekistan)

Igemberlina M. B., Doctor of Ph.D, Associate Professor of the Department of Surveying and Geodesy, NAO «Karaganda Technical University named after A. Saginov» (Karaganda, Kazakhstan)