

УДК: 622.83:[528.2:629.78]

Панжин Андрей Алексеевич

кандидат технических наук,
ученый секретарь,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58
e-mail: panzhin@igduran.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ
ГЕОДИНАМИКИ МАССИВА ГОРНЫХ
ПОРОД КАЧКАНАРСКОГО
ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО
КОМБИНАТА***Аннотация:*

Приведены методика и результаты исследования современной геодинамической активности массива горных пород Качканарского горно-обогатительного комбината. Определение параметров циклических короткопериодных геодинамических движений осуществлялось в виде непрерывного многочасового мониторинга комплексами спутниковой геодезии. Необходимость в проведении исследований по организации геодинамического мониторинга на карьерах Качканарского ГОКа обусловлена особенностями тектонического строения вмещающего массива, в частности, влиянием серии активных тектонических нарушений, пересекающих карьеры и хвостохранилища. С проявлениями геодинамической активности, реализующейся в виде трендовых и циклических короткопериодных подвижек по тектоническим нарушениям, на комбинате связаны деформационные процессы, происходящие на северо-западном борту Главного карьера, а также прорыв дамбы хвостохранилища.

Выполнены экспериментальные исследования параметров циклических короткопериодных геодинамических движений на массиве горных пород, который пересекается серией активных тектонических нарушений субмеридионального направления. Установлены амплитуды смещений и деформаций в горизонтальной плоскости по высоте и в трехмерном пространстве, выполнен анализ точности геодезических построений. Определены методами Фурье-анализа преобладающие частоты короткопериодных циклических движений, при этом оценивались графики периодограмм, пиковые значения которых соответствуют их периоду.

Показана роль циклических короткопериодных геодинамических движений в формировании общего напряженно-деформированного состояния района размещения карьеров и хвостохранилищ ЕВРАЗ КГОК. При этом указанные геодинамические движения приводят к формированию усталостных эффектов в конструкциях и материалах, «расшатыванию» массива горных пород, слагающих прибортовой массив, измене-

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.057

Panzhin Andrey A.

Candidate of Engineering Sciences,
Scientific Secretary
of the Institute of Mining of the Ural Branch of RAS,
620075, Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: panzhin@igduran.ru

**STUDY OF SHORT-PERIOD
GEODYNAMICS OF ROCK MASS
OF KACHKANARSKY MINING
AND PROCESSING STATION***Abstract:*

The paper presents the methods and results of research of current geodynamic activity of the rock mass of Kachkanarsky mining and processing station. The parameters of cyclic short-period geodynamic movements were determined in the form of continuous multi-hour monitoring by satellite geodesy complexes. The need for geodynamic monitoring of the open-pit mines of Kachkanarsky MPS is due to the aspects of the tectonic structure of the host rock mass, in particular, the impact of a series of active tectonic disturbances crossing the open-pit mines and the tailing pit. The deformation processes taking place on the northwest wall of the open-pit mine Glavny, as well as the breach of the tailing pit dam are connected with the geodynamic activity, which is realized in the form of trend and cyclic short-period movements by tectonic disturbances. The experimental studies of the parameters of cyclic short-period geodynamic movements at the rock mass, which is intercepted by a series of active tectonic disturbances of submeridional direction. The amplitudes of movements and deformations in the horizontal plane in height and in three-dimensional space have been established, and the accuracy of geodetic structures has been analyzed. The prevailing frequencies of short-period cyclic movements have been determined by the Fourier-analysis methods, and the graphs of periodograms, whose peak values correspond to their period have been estimated. The paper shows the role of cyclic short-period geodynamic movements in the formation of the general stress-deformed state of the area of open-pit mines and tailing pits of EVRAZ Kachkanarsky MPS. At the same time, these geodynamic movements lead to the formation of fatigue effects in structures and materials, the "loosening" of rock masses that compose the adjacent rock mass, the changes in the strength properties of grounds at the base of engineering structures, and the effect of thixotropy.

нию прочностных свойств грунтов, находящихся в основании инженерных сооружений, проявлению эффекта тиксотропии.

Ключевые слова: современная геодинамическая активность, деформации, массив горных пород, тектонические нарушения, геодинамический мониторинг, короткопериодная геодинамика, спутниковая геодезия, прибортовой массив, хвостохранилище.

Key words: current geodynamic activity, deformations, rock mass, tectonic disturbances, geodynamic monitoring, short-period geodynamics, satellite geodesy, adjacent rock mass, tailing pit.

Введение

Горно-технологическая система Качканарского горно-обогатительного комбината (ЕВРАЗ КГОК), ведущего отработку Гусевогорского железорудного месторождения, включает в себя четыре карьера – Главный, Южная Залежь, Западный и Северный, а также намывное косогорное хвостохранилище для складирования хвостов мокрой магнитной сепарации. Программа технологического развития ЕВРАЗ КГОК предусматривает, кроме дальнейшей отработки Гусевогорского месторождения, начало отработки собственно Качканарского месторождения, а также ввод в строй новых отсеков, предназначенных для складирования хвостов обогащения и осветления жидкой фазы пульпы [1, 2].

Институтом горного дела УрО РАН выполняются по результатам GPS/ГЛОНАС измерений инструментальные наблюдения с целью оценки геодинамической активности массива горных пород и земной поверхности, непосредственно прилегающих к карьерам Гусевогорского месторождения и хвостохранилищам Качканарского ГОКа. Необходимость в проведении исследований по организации геодинамического мониторинга на карьерах Качканарского ГОКа обусловлена особенностями тектонического строения вмещающего массива, в частности влиянием серии активных тектонических нарушений, пересекающих карьеры и хвостохранилища (рис. 1).

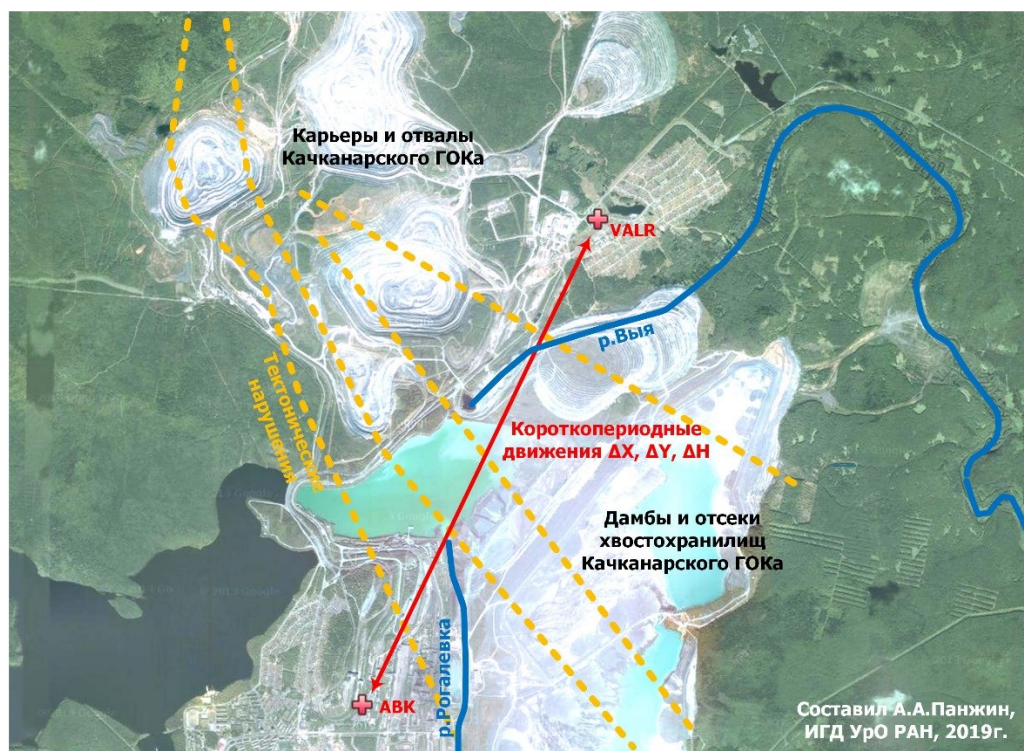


Рис. 1 – Горно-технологическая система ЕВРАЗ КГОК и схема исследования циклических геодинамических движений

Геодинамическая активность тектонических нарушений особенно ярко проявляется на Северо-западном борту Главного карьера, где деформационные процессы фиксируются на протяжении более 25 лет [3, 4]. С проявлениями геодинамической активности связывается авария, произошедшая 2 ноября 1999 г., когда произошел прорыв дамбы хвостохранилища с разрушением инженерных сооружений, расположенных на примыкающих участках [5]. В результате проведения комплекса геофизических исследований геомеханических и гидрогеологических параметров природных и техногенных горных массивов дамбы хвостохранилища ЕРАЗ КГОК было установлено, что прорыв дамбы произошел в месте ее пересечения с тектоническим нарушением [6], при этом была выдвинута версия об ослаблении конструкции дамбы вследствие ее тиксотропии под влиянием современных геодинамических движений. Подобные аварийные ситуации на хвостохранилищах и их дамбах также описывались другими исследователями [7].

Методология исследований

Экспериментальными исследованиями ИГД УрО РАН установлено, что современная геодинамическая активность характеризуется движениями трендового и циклического характера [8].

Трендовые движения происходят в виде взаимных подвижек соседних структурных блоков массива горных пород с относительно постоянной скоростью и направлением в течение продолжительного промежутка времени, сопоставимого со сроком службы объекта. Циклические короткопериодные движения носят полигармонический характер и слагаются из многочисленных знакопеременных движений с разными частотами и амплитудами перемещения в циклах.

Трендовые движения могут иметь как естественную природу, обусловленную тектоническими подвижками по границам структурных блоков, так и техногенную, обусловленную перераспределением напряжений и деформаций в породном массиве под воздействием горных работ, откачки подземных вод и других факторов. Зафиксированные инструментальными методами величины трендовых смещений составляют от 0,5 мм/год для имеющих естественную природу, до 200 мм/год для техногенных [9]. Короткопериодные циклические геодинамические движения представляют собой полигармонические движения, имеющие широкий спектр частот и амплитуду возвратных движений. Продолжительность циклов изменяется от нескольких секунд, часа, полутора часов и до нескольких месяцев [10].

В работах [8 – 10] рассматриваются различные механизмы взаимодействия иерархически блочного массива с объектами недропользования, расположенными на них, при этом выделяются непосредственное разрушение объекта вследствие превышения уровня допустимых деформаций, нарушение его целостности при формировании в несущих конструкциях усталостных деформаций и нарушение оснований объектов, расположенных на насыпных и намывных основаниях при проявлении тиксотропии. Последний механизм также применим для насыпных дамб, в основании которых залегают активные тектонические нарушения.

Инструментальные измерения и их камеральная обработка на объектах ЕВРАЗ КГОК проводились с использованием авторских методик и алгоритмов, разработанных в ИГД УрО РАН и опробованных на ряде предприятий Урала, Сибири и Казахстана по авторским методикам [11, 12].

В целях определения параметров циклических короткопериодных геодинамических движений измерения осуществляются в виде непрерывного мониторинга комплексами спутниковой геодезии за системой пунктов в течение нескольких часов, а в некоторых случаях для уточнения параметров, связанных, например, с лунно-солнечными приливами, – нескольких суток. Измерениями фиксируется изменение пространственных координат пунктов и их компонент мониторинговой сети [13]. Непрерывные наблюдения дискретизируются на нужные интервалы времени, за продолжительность которых и

определяются средние значения приращений координат. Интервал дискретизации может составлять от нескольких секунд до нескольких десятков минут. От длительности интервала зависит предел фиксируемых частот циклических движений. Чем меньше интервал, тем больше частоты циклов фиксируются измерениями [14].

Непрерывный мониторинг комплексами спутниковой геодезии обеспечивает получение приращений всех трех координат точки стояния прибора в заданный момент времени. Точность измерения смещений между точками составляет 3 – 5 мм. Такую точность, как и при определении трендовых движений, обеспечивает дифференциальная технология спутниковой геодезии GPS, которой два или более одновременно работающих приемника, установленные на концах измеряемых отрезков, позволяют определить величину ионосферной поправки, за счет которой и достигается точность [15]. Для определения частот и амплитуд короткопериодных колебаний породного массива был выполнен ряд серий натурных наблюдений, в которых было задействовано 2 одновременно работающих двухсистемных (GPS-ГЛОНАСС) двухчастотных приемника геодезического класса Sokkia GRX-1, паспортная и фактическая точность которых соответствует 3 – 5 мм+1 ppm в плане и 5 – 7 мм+1 ppm по высоте.

Параметры циклических геодинамических движений исследовались по изменению компонент вектора, вычисленных между двумя пунктами, являющимися опорными для геодинамического полигона – АВК, расположенного на кровле административного здания ОАО «ЕВРАЗ КГОК» и VALR – пункта Государственной геодезической сети, расположенного в поселке Валерьяновский, в непосредственной близости от карьеров Главный, Северный и Западный (см. рис. 1).

Вектор АВК-VALR пересекает как минимум четыре тектонических нарушения субмеридионального направления, формирующих напряженно-деформированное состояние Гусевогорского месторождения [16]. Кроме этого, наличие протяженных тектонических нарушений субмеридионального направления подтверждается данными геофизических полевых электроразведочных работ [17].

Камеральная обработка полевых наблюдений выполнена с применением модуля Motion Tracker фирменного обеспечения Trimble Total Control. Заверочные расчеты были выполнены по авторской методике, описанной в работе [12], при этом выполнялось реформатирование исходных файлов данных формата RINEX путем расстановки в них меток начала и окончания дискретных интервалов.

Анализ точности

Для контроля обработки результатов инструментальных измерений, кроме модуля Motion Tracker, также использовался пакет Waypoint GrafNet/GrafNav, поддерживающий мощные возможности по вычислению кинематических траекторий, в том числе не только от одиночных базовых станций, но и для мульти-базовой обработки данных, что многократно повышает надежность и точность спутниковых геодезических определений.

Точность методики исследования короткопериодной геодинамики массива горных пород определялась путем сопоставления результатов камеральной обработки измерений, выполненных в прибортовом массиве по двум сериям инструментальных наблюдений, в каждой из которых были задействованы данные по 4 – 5 реперам наблюдательной станции. В результате эксперимента были получены 16 независимых наборов векторов между реперами, на которых производились долговременные непрерывные наблюдения. Результаты обработки исходных данных в различных программных пакетах представлены в виде розы-диаграммы по компонентам «север-юг» и «запад-восток» короткопериодных геодинамических движений (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что по результатам обработки в обеих программных пакетах четко фиксируется главное направление действия горизонтальных короткопериодных

геодинамических движений по компонентам «север-юг» и «запад-восток», которое преимущественно действует по азимуту 110° (290°), второстепенные направления действуют по азимутам 10° (190°) и 140° (330°). Однако соотношения величин главного и второстепенного направлений значительно отличаются между собой от 3:1, полученного в программе GrafNet/GrafNav, до 1:1.33, полученного в модуле Motion Tracker программы. При этом по результатам анализа внутренней оценки погрешностей программа GrafNet/GrafNav демонстрирует более высокую точность камеральной обработки.

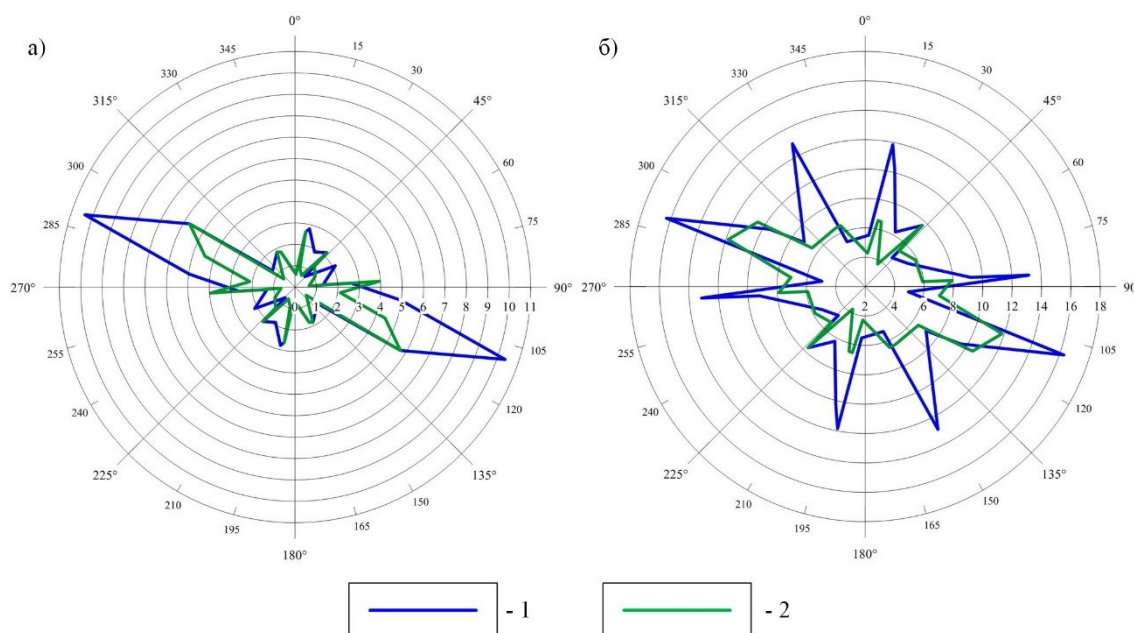


Рис. 2 – Сопоставление результатов камеральной обработки в программе GrafNet/GrafNav (1) и модуле Motion Tracker программы Trimble Total Control (2)

Точность геодезических построений в текущем режиме определялась двумя независимыми методами. На первом этапе анализировалась внутренняя сходимость результатов, которая оценивалась по среднеквадратичному отклонению, полученному по каждой оси координат. На втором этапе для ряда дискретных интервалов на этапе полевых работ проводилось накопление данных дополнительным приемником, что в дальнейшем позволило произвести анализ невязок геометрического замыкания замкнутых треугольников, определить фактическую точность геодезических построений и сопоставить ее со значениями, полученными на первом этапе.

Результаты исследований

В результате было получено пять наборов векторов, вычисленных с дискретным интервалом, равным 10 мин, между точками, на которых производились непрерывные наблюдения, и их компоненты (север-юг, запад-восток, превышения). Каждая серия инструментальных измерений занимала по времени от 550 до 640 мин, измерения выполнялись в период 2010 – 2019 гг.

Амплитуда изменения геометрии интервала АВК-VALR длиной 6500 м варьировалась от 33 до 44 мм в горизонтальной плоскости, что соответствует величинам деформаций растяжения-сжатия до $6,7 \cdot 10^{-6}$ и от 62 до 80 мм по высоте, что соответствует величинам деформаций наклона до $12,3 \cdot 10^{-6}$. При этом амплитуда пространственного (3D) вектора геодезических движений варьируется от 48 до 73 мм, что соответствует величинам пространственных деформаций до $11,3 \cdot 10^{-6}$.

Зафиксированные короткопериодные геодинамические движения имеют преимущественно субмеридиональное направление действия, что было определено по соотношению их компонент ΔN (север-юг) к ΔE (запад-восток), составляющему до 2,8, при этом в сериях измерений 2011 г. данное соотношение меньше, и составляет 1,1 – 1,4, что свидетельствует о вариации деформационного поля не только по величине, но и направлению.

На графиках геодинамических сдвижений интервала АВК-VALR также был отмечен знакопеременный характер горизонтальных и вертикальных деформаций с выраженной периодичностью. С этой целью была поставлена задача определения периодов циклических деформаций массива.

Обсуждение результатов

Анализ приведенных данных показывает, что на исследуемом участке зафиксированы относительно высокие значения амплитуд циклических геодинамических движений. По сравнению с аналогичными величинами, полученными на железорудных месторождениях Урала и Казахстана [18], отмечается превышение по компонентам ΔN (север-юг) и ΔH (высота) в 3 – 4 – 5 раз. Также обращает внимание высокая вариативность циклических геодинамических движений в горизонтальной плоскости, компоненты ΔN (север-юг) и ΔE (запад-восток) в зависимости от серии наблюдений изменяются по амплитуде почти в два раза.

Преобладающие частоты короткопериодных циклических движений определялись путем проведения анализа Фурье пространственно-временных рядов смещений по осям координат. Для частотно-спектрального анализа методом Фурье были использованы временные ряды, содержащие до 64 дискретных измерений. Оценивались графики периодограмм короткопериодных циклических деформаций массива. Пиковые величины графиков периодограмм соответствуют периоду короткопериодных знакопеременных деформаций (рис. 3).

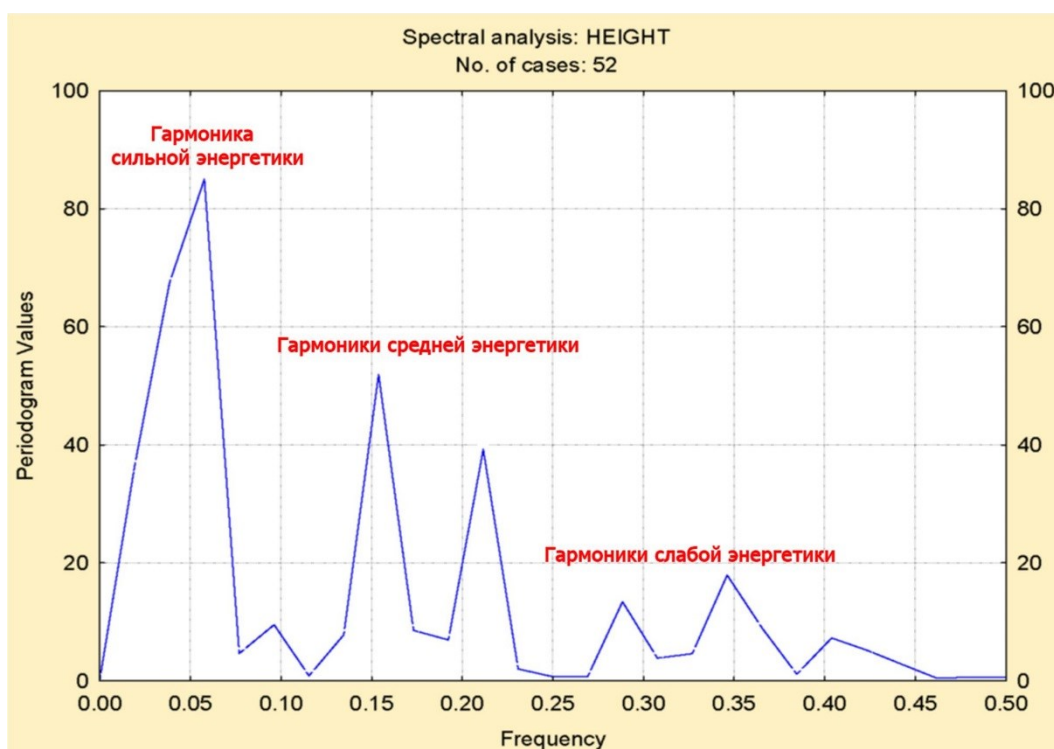


Рис. 3 – Пример периодограммы анализа Фурье

В результате проведения анализа по периодограммам было установлено (рис. 4), что преобладающими частотами циклических движений с гармониками сильной и средней энергетики являются периоды, соответствующие 10 – 20 и 40 – 60 мин.

Одной из ключевых особенностей циклических движений массива горных пород Гусевогорского месторождения является значительное расширение спектра частот колебаний (гармоники свыше 70 – 90 мин) в сериях измерений 2011 г. Также по результатам исследования трендовых геодинамических движений 2011 г. является «переломным», поскольку именно на этом рубеже на различных объектах недропользования происходила миграция активных областей деформаций со сменой направлений сдвижений как в горизонтальной плоскости, так и по высоте [10].

Компоненты	Гармоники колебаний, мин														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Измерения - 05.10.2010															
ΔN		x				x									
ΔE															
ΔH					x			x							
$3D$	x			x											
Измерения - 07.10.2010															
ΔN			x												
ΔE	x														
ΔH	x				x										
$3D$	x				x										
Измерения - 28.09.2011															
ΔN	x						x	x					x		
ΔE					x										
ΔH		x			x			x			x		x		
$3D$		x			x						x				
Измерения - 29.09.2011															
ΔN	x														
ΔE				x				x							
ΔH		x				x			x				x		
$3D$	x							x			x				x
Измерения - 09.07.2014															
ΔN			x						x						
ΔE				x											
ΔH		x		x											
$3D$		x		x											

x - Гармоники сильной энергетики
x - Гармоники средней энергетики

Рис. 4 – Основные гармоники циклических геодинамических движений

Вышесказанное свидетельствует о высокой роли циклических геодинамических движений в формировании общего напряженно-деформированного состояния района размещения карьеров и хвостохранилищ ЕВРАЗ КГОК. Не исключается неравномерный,

в частности сезонный, характер проявления цикличной короткопериодной геодинамической активности, для установления величин которой необходимы дополнительные измерения в течение продолжительного периода.

При этом, с одной стороны, короткопериодные циклические геодинамические движения хотя и имеют сравнительно невысокие амплитуды, приводят к формированию усталостных эффектов в конструкциях и материалах, «расшатыванию» массива горных пород, слагающих прибортовой массив, изменению прочностных свойств грунтов, находящихся в основании инженерных сооружений, проявлению эффекта тиксотропии и проч.

С другой стороны, в виде короткопериодных циклических геодинамических движений происходит разгрузка массива горных пород, при этом происходит снижение уровня напряженно-деформированного состояния, в частности его трендовой составляющей, препятствуя его проявлению в форме динамических событий.

Заключение

1. В результате проведенных исследований было установлено, что району размещения хвостохранилищ ЕВРАЗ КГОК и их дамб присуща высокая геодинамическая активность, обусловленная наличием активных тектонических нарушений, фиксируемых по результатам геофизических изысканий, а также современными геодинамическими движениями, в том числе короткопериодного циклического характера.

2. Короткопериодные циклические геодинамические движения приводят к изменению прочностных свойств грунтов, проявлению эффекта тиксотропии, повышению водопроводящих свойств, коэффициентов фильтрации и проч. Необходимо иметь в виду их негативное воздействие на устойчивость дамб хвостохранилищ, у которых на участках геодинамически активных тектонических нарушений под воздействием циклических подвижек нарушается процесс уплотнения хвостов и других материалов дамбы, что способствует активному формированию подземных водотоков.

3. Камеральную обработку результатов натурных экспериментальных исследований необходимо проводить с использованием как минимум двух независимых программных продуктов – для выявления как наиболее выраженных основных направлений действия короткопериодных циклических геодинамических движений, так и их максимальных и минимальных величин.

4. Для фиксации уровня современных геодинамических движений трендового и циклического характера, с целью обеспечения безопасности горных работ и размещения отходов обогащения, необходима организация специального деформационного долгосрочного мониторинга, охватывающего район карьеров, размещения хвостохранилищ и их дамб.

Литература

1. Влох Ю.В. Перспективы развития Качканарского ГОКа / Ю. В. Влох // Горный журнал. - 2016. - № 7. - С. 46-50.

2. Кузнецов А.Г. Хвостохранилище Качканарского ГОКа и перспективы его развития / А.Г. Кузнецов, О.В. Лытин, Р.П. Просвирякова // Горный журнал. - 2003. - № 9. - С. 93-95.

3. Яковлев А.В., Волкодаева М.С., Ермаков Н.И. Тектоническая дезинтеграция массива потенциально оползневого участка борта главного карьера Качканарского ГОКа / А.В. Яковлев, М.С. Волкодаева, Н.И. Ермаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2004. - № 7. - С. 32-35.

4. Зотеев В.Г. Нетипичные деформации бортов глубоких рудных карьеров и меры по их предотвращению / В.Г. Зотеев, О.В. Зотеев // Горный журнал. - 2007. - № 1. - С. 40-45.

5. Покровский Г.И. Анализ причин аварий грунтовых подпорных сооружений водохозяйственных систем комплексного назначения / Г.И. Покровский, Т.Г. Войнич-Сяноженский // Водоснабжение и санитарная техника. - 2012. - № 2. - С. 47-52.
6. Сашурин А.Д. Использование геоэлектрических методов для оценки геомеханических и гидрогеологических параметров природных и техногенных горных массивов дамбы хвостохранилища Качканарского ГОКа / А.Д. Сашурин, В.В. Мельник // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2002. - № 12. - С. 85-87.
7. Хвостохранилище Карамкенского горно-металлургического комбината: инженерно-геологические проблемы и причины аварийного разрушения / В.Е. Глотов, Л.П. Глотова, А.П. Бульбан, И.Д. Митрофанов // Вестник ДВО РАН. - 2010. - № 3. - С. 31-39.
8. Сашурин А.Д. Геомеханика в горном деле: фундаментальные и прикладные исследования / А. Д. Сашурин // Горный журнал. - 2012. - № 1. - С. 29-32.
9. Сашурин А.Д. // Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород / А. Д. Сашурин // Проблемы недропользования. - 2015. - № 1 (4). С. 38-44. - DOI: 10.18454/2313-1586.2015.4.890.
10. Коновалова Ю.П. Особенности учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения ответственных объектов недропользования / Ю.П. Коновалова // Известия вузов. Горный журнал. - 2018. - № 6. - С. 6-17.
11. Панжин А.А. Исследование гармоник квазипериодических современных деформаций породного массива на больших пространственно-временных базах / А.А. Панжин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - № 9. - С. 312-331.
12. Панжин А.А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии / А.А. Панжин // Маркшейдерия и недропользование. - № 2(8). - 2003. - С. 43-54.
13. Kenneth M. Cruikshank, Curt D. Peterson. Current State of Strain in the Central Cascadia Margin Derived from Changes in Distance between GPS Stations / Kenneth M. Cruikshank, Curt D. Peterson // Open Journal of Earthquake Research. - 2015. Vol. 4. - P. 23-36.
14. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering / He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X. // Advances in Space Research. - 2015. - Vol. 55, Issue 5. March. - P. 1316-1327.
15. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources / He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. // Journal of Geodynamics. - 2017. - Vol. 106. May. - P. 12-29.
16. Пироксениты Качканара / В.Г. Фоминых, П.И. Самойлов, Г.С. Максимов, В.А. Макаров. - Свердловск: Урал. фил. АН СССР, 1967. - 84 с.
17. О выполнении комплекса изысканий по изучению разгрузки подземных вод, являющихся частью стока р. Рогалевка в долину региональной дрены р. Выя: отчет / исп. А.А. Холодилин, Г.К. Евсюнин, В.О. Чертовиков ; ООО «Инженерные изыскания». - Екатеринбург, 2019. - 83 с.
18. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. База экспериментальных данных о параметрах современных геодинамических движений. / А.Д. Сашурин, В.В. Мельник, А.А. Панжин [и др.]; заявитель и правообладатель Институт горного дела УрО РАН (ИГД УрО РАН). - №2014620345.