

УДК 622.831.1:528.5

**Сашурин Анатолий Дмитриевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий отделом геомеханики,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г.Екатеринбург,  
ул.Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [sashour@igd.uran.ru](mailto:sashour@igd.uran.ru)

**Панжин Андрей Алексеевич**  
кандидат технических наук,  
ученый секретарь,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [panzhin@igduran.ru](mailto:panzhin@igduran.ru)

### ОРГАНИЗАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА КАРЬЕРАХ КАЧКАНАРСКОГО ГОКА\*

*Аннотация:*

*Приводятся методика и результаты инструментального определения природного и техногенно измененного напряженно-деформированного состояния массива на Качканарском ГОКе, выполненные с использованием технологий спутниковой геодезии. Определены величины трендовых и циклических короткопериодных движений на больших базах, вызванных современной геодинамикой и интенсивным недропользованием; выполнена оценка напряженно-деформированного состояния массива в области влияния карьеров Качканарского ГОКа.*

*Ключевые слова:* деформации массива, спутниковая геодезия, массив горных пород, разломная зона, современная геодинамика, мониторинг

**Sashourin Anatoly D.**  
Doctor of technical sciences,  
professor, the head of the department,  
the Institute of Mining UB RAS,  
620075, Yekaterinburg,  
Mamin-Sibiryak St., 58  
e-mail: [sashour@igd.uran.ru](mailto:sashour@igd.uran.ru)

**Panzhin Andrey A.**  
candidate of technical sciences,  
scientific secretary,  
the Institute of Mining UB RAS  
e-mail: [panzhin@igduran.ru](mailto:panzhin@igduran.ru)

### GEODYNAMIC MONITORING ARRANGEMENT IN KACHKANAR OPEN-PIT MINES

*Abstract:*

*The method and results of instrumental determination of rock mass natural and manmade modified stressed-deformed state in Kachkanar open-pit mines are cited that are performed using the technologies of satellite geodesy. The values of trend and cyclic short-period motions in large databases caused by up-to-date geodynamics and intensive mineral resources use are determined; the estimate of rock mass stressed-deformed state in the area of Kachkanar open-pit mines influence is performed.*

*Key words:* rock mass deformation, satellite geodesy, rock mass, fracture zone, up-to-date geodynamics, monitoring

Необходимость в проведении исследований по организации геодинамического мониторинга на карьерах Качканарского ГОКа обусловлена особенностями геомеханических условий разработки Гусевогорского месторождения, обрабатываемого тремя карьерами – Главным, Северным и Западным. Эти особенности заключаются в том, что при высокой крепости скальных горных пород, слагающих борта карьеров, на некоторых участках бортов и уступов устойчивость не согласуется с прочностными и деформационными характеристиками пород. Одним из контрастных примеров этой несогласованности может служить Северо-западный борт Главного карьера, где деформационные процессы проявляются на протяжении более 25 лет.

Разработка месторождений полезных ископаемых сопряжена с мощным техногенным воздействием на окружающий горный массив. При эксплуатации месторождения, вследствие образования карьерной выемки, перемещения горной массы из карьера в отвалы и прочих факторов, происходит нарушение первоначального напряженно-деформированного состояния породного массива и формирование вторичного напряженно-деформированного состояния. Изменения, как правило, не только затрагивают прибортовой массив, но и проявляются на достаточно обширных территориях, прилегающих к месторождению.

\* Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ №14-05-00324

Экспериментальными исследованиями ИГД УрО РАН выявлены два вида современных геодинамических движений – трендовые (криповые) и циклические. 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 [1]. Циклические движения носят полигармонический характер и слагаются из многочисленных знакопеременных движений с разными частотами и амплитудами перемещения в циклах [2].

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 [3].

Короткопериодные циклические движения имеют широкий полигармонический спектр частот с продолжительностью циклов от 30 – 60 сек до 1 часа, нескольких часов, суток и более.

Все измерения по определению компонент трендовой и циклической геодинамической активности производились с использованием комплекса спутниковой геодезии GPS-ГЛОНАСС, позволяющего с высокой точностью определять пространственные координаты точек на земной поверхности [4 – 5]. При этом в режиме дифференциальной GPS изначально определяется вектор – приращение координат в геоцентрической системе между фазовыми центрами двух и более антенн приемников, отцентрированных над пунктами геодезической сети, координаты которых необходимо определить (рис. 1).

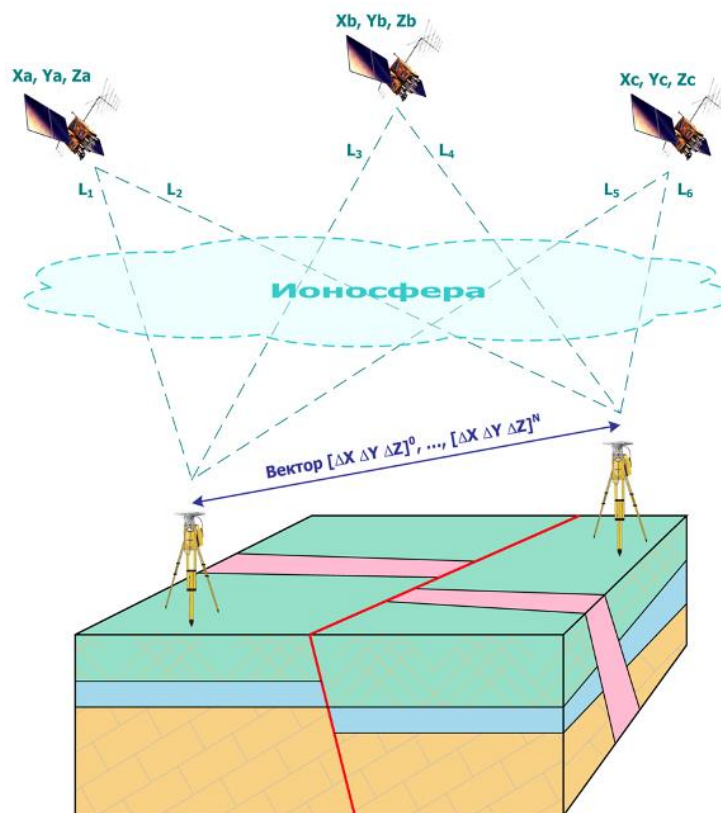


Рис. 1 – Методика определения параметров современных геодинамических движений

В дальнейшем совокупность полученных векторов, образующая пространственную геодезическую сеть, проходит контроль на точность геометрических построений путем определения фактических невязок по замкнутым контурам и математически строго уравнивается в принятой системе координат – центрируется и ориентируется.

При этом определяются современные пространственные координаты пунктов государственной геодезической, маркшейдерско-геодезической сети, реперов геодинимического полигона, а при их сопоставлении с ранее полученными исходными значениями определяются геодинимические подвижки, происходящие в массиве горных пород.

Пространственная координатная привязка пунктов геодинимического полигона Гусевогорского месторождения осуществлялась четырьмя одновременно работающими двухсистемными (GPS-ГЛОНАСС), двухчастотными и приемниками геодезического класса Sokkia GRX-1, паспортная и фактическая точность которых соответствует  $3 - 5 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$  в плане и  $5 - 7 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$  по высоте. В качестве опорных использовались два пункта – АВК, расположенный на кровле административного здания ОАО «ЕВРАЗ КГОК» и VALR – пункт Государственной геодезической сети, расположенный в поселке Валерьяновский, в непосредственной близости от карьеров Главный, Северный и Западный.

Трендовые движения определяются на основе анализа изменений пространственных приращений координат (векторов)  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  между пунктами геодезических сетей или реперов наблюдательных станций, выполненных в промежутках между повторными циклами измерений.

Полученные в результате инструментальных наблюдений деформации интервалов с использованием математического аппарата механики сплошной среды преобразованы в тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций. В случае, если необходимо определение величин и направлений векторов трендовых движений, геодезическая привязка опорных реперов наблюдательной станции и их абсолютное позиционирование осуществляется от пунктов глобальной сети IGS, пространственное положение которых определяется в динамической системе координат ITRF [6].

На исследуемом участке в прибортовом массиве расположен ряд реперов геодинимического полигона и маркшейдерско-геодезической сети, координаты которых были ранее определены [7] в период 2010 – 2011 гг. (рис. 2).

По полученным разностям пространственных координат были вычислены величины сдвижений реперов геодинимического полигона и отстроены полные векторы смещений пунктов, отражающие произошедшие за этот период трендовые движения и вызванные ими деформации. Векторы смещений являются достаточно информативными данными о деформационных процессах, позволяющими далее расчетным путем определить все необходимые параметры деформаций.

Анализ данных трендовых движений – величин и направлений векторов сдвижений, изолиний вертикальных сдвижений – выявил сложный знакопеременный характер деформирования породного массива Гусевогорского месторождения и структурно-блочный характер распределения параметров деформаций.

Обращает внимание смена картины распределения трендовых геодинимических движений за различные периоды времени: 2010 – 2011 гг. и 2011 – 2014 гг.

Наиболее выделяется знакопеременный трендовый характер деформирования массива горных пород, слагающего перешеек между восточным бортом Западного и западным бортом Северного карьера.

В отмеченном районе отмечается как смена направления и величин векторов горизонтальных сдвижений, так и характер деформирования в вертикальной плоскости – смена оседаний реперов на поднятия.

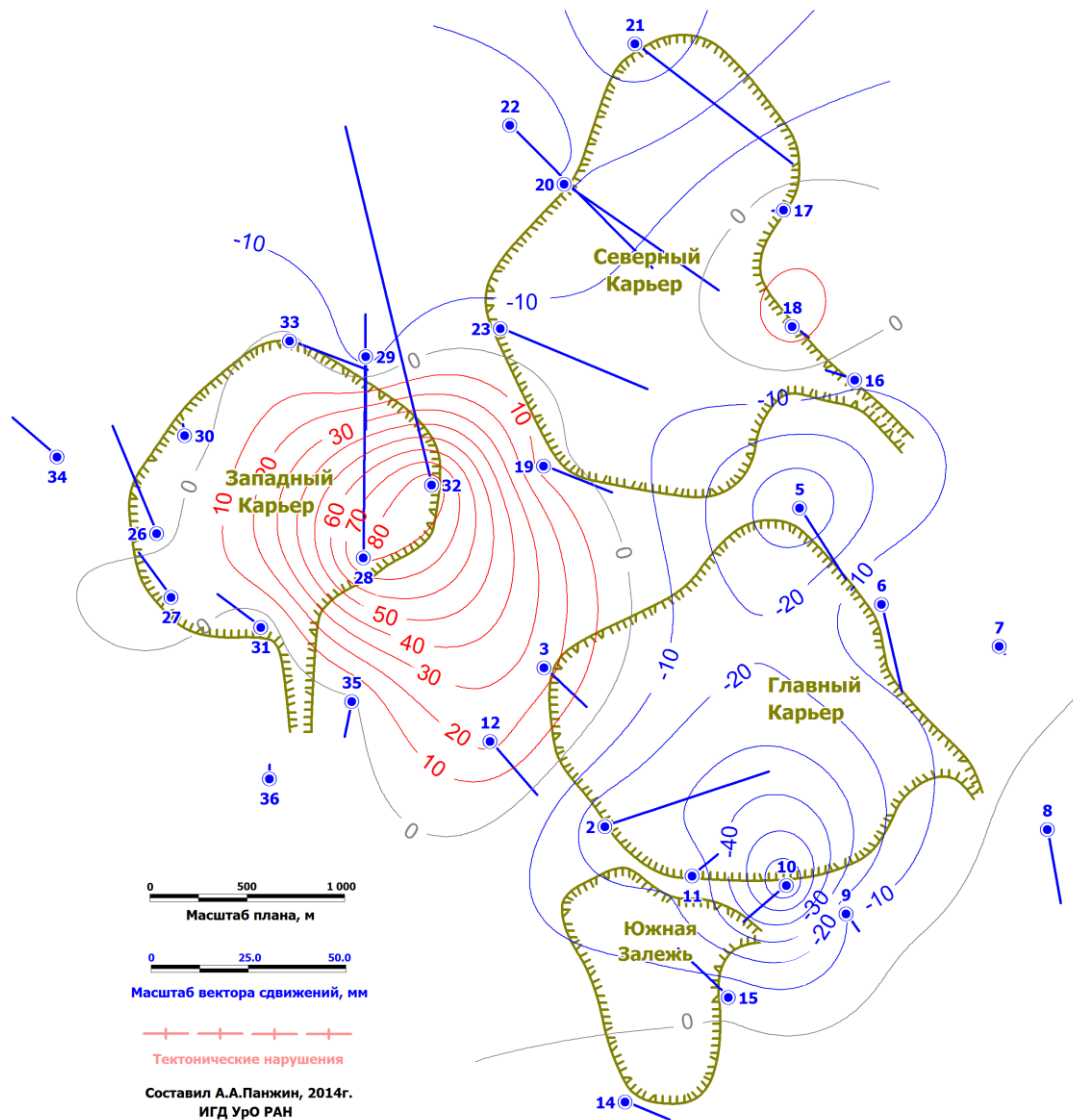


Рис. 2 – Схема геодинамического полигона Гусевогорского месторождения, векторы горизонтальных и изолинии вертикальных сдвижений за период 2011 – 2014 гг.

Это свидетельствует о формировании в массиве горных пород сложного вторичного напряженно-деформированного состояния, с концентрацией деформаций на границах структурных блоков, с миграцией их во времени.

Как было отмечено выше, короткопериодные геодинамические движения представляют собой полигармонические движения, имеющие широкий спектр частот и амплитуду возвратных движений. Продолжительность циклов изменяется от нескольких секунд, часа, полутора часов до нескольких месяцев [8]. Натурные измерения и их камеральная обработка проводились с использованием методик и алгоритмов, разработанных в ИГД УрО РАН и опробованных на ряде предприятий Урала, Сибири и Казахстана [9].

В целях определения параметров циклических короткопериодных геодинамических движений измерения осуществляются в виде непрерывного мониторинга комплексами спутниковой геодезии за системой пунктов в течение нескольких часов или суток. Измерениями фиксируется изменение пространственных координат пунктов мониторинговой сети.

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.

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 (рис. 3).

Вектор АВК-VALR пересекает как минимум четыре тектонических нарушения субмеридионального направления, формирующих напряженно-деформированное состояние Гусевогорского месторождения.

Камеральная обработка полевых наблюдений выполнена с применением модуля Motion Tracker фирменного обеспечения Trimble Total Control. В результате получается набор векторов, вычисленных с дискретным интервалом, равным 10 мин, между точками, на которых производились непрерывные наблюдения, и их компоненты (север-юг, запад-восток, превышения).

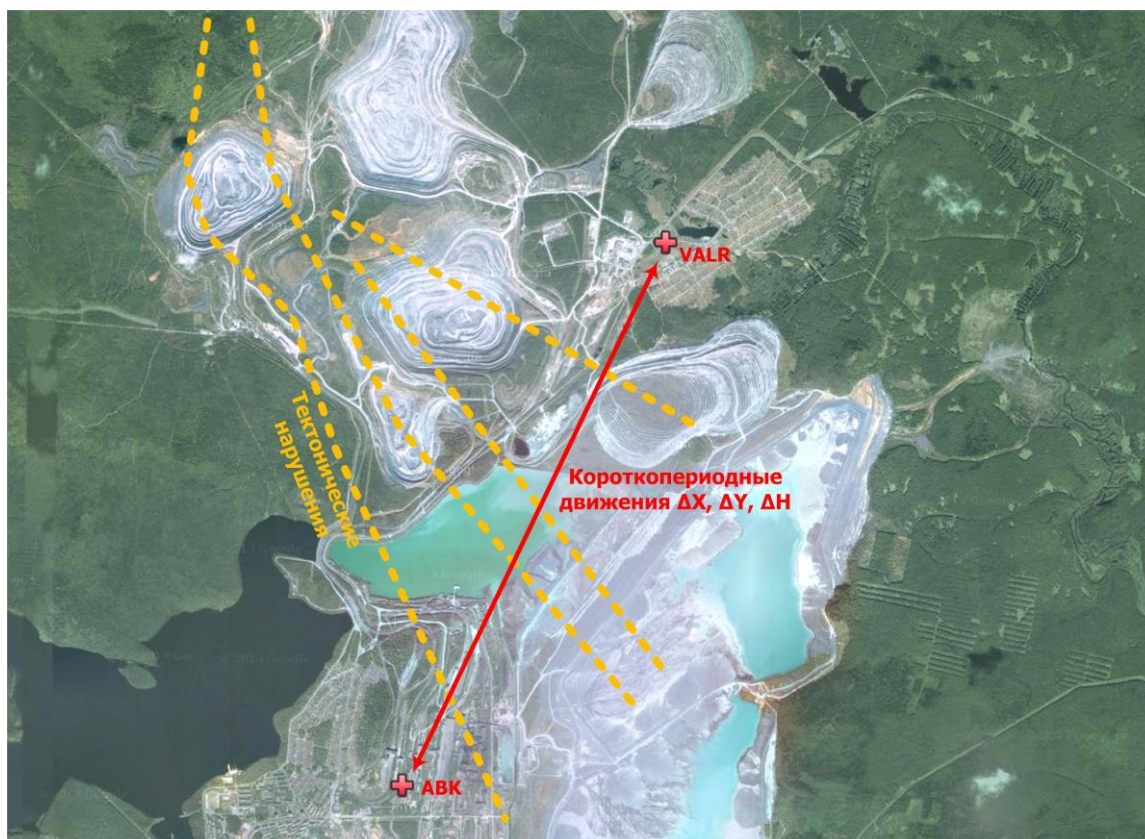


Рис. 3 – Схема исследования циклических геодинамических движений

Анализ данных показывает, что на исследуемом участке зафиксированы высокие значения амплитуд циклических геодинамических движений. По сравнению с аналогичными величинами, полученными на железорудных месторождениях Урала и Казахстана [10], отмечается превышение по компонентам  $\Delta N$  (север-юг) и  $\Delta h$  (высота) в 3 – 4 – 5 раз. Также обращает на себя внимание высокая вариативность циклических геодинамических движений в горизонтальной плоскости, компоненты  $\Delta N$  (север-юг) и  $\Delta E$  (за-

пад-восток) в зависимости от серии наблюдений изменяются по амплитуде почти в два раза.

Преобладающие частоты короткопериодных циклических движений определялись путем проведения Фурье-анализа пространственно-временных рядов смещений по осям координат. Для частотно-спектрального анализа, выполненного с помощью метода 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. 4).

В результате проведения анализа по периодограммам было установлено, 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.

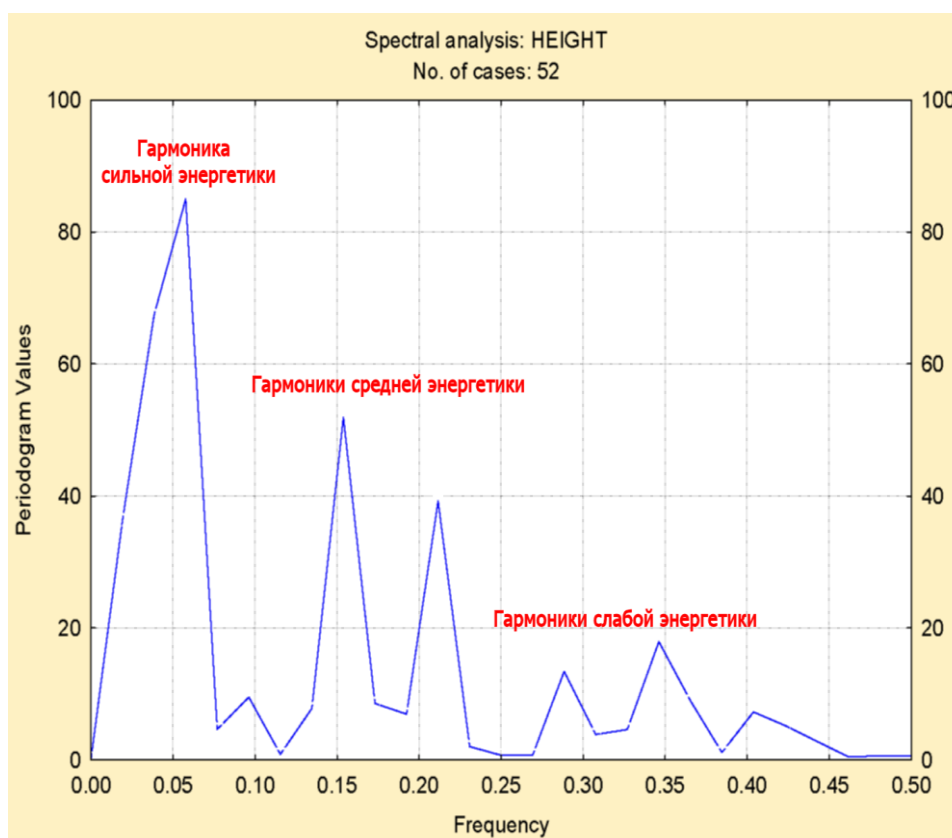


Рис. 4 – Пример периодограммы анализа Фурье

Выше было показано, что по результатам исследования трендовых геодинамических движений 2011 г. является «переломным», поскольку именно на рубеже 2011 г. произошла миграция активных областей деформаций со сменой направлений сдвижений как в горизонтальной плоскости, так и по высоте.

Это свидетельствует о значимой роли циклических геодинамических движений в формировании общего напряженно-деформированного состояния района размещения карьеров ОАО «ЕВРАЗ КГОК». Также нельзя исключить неравномерного, в частности сезонного, проявления циклической короткопериодной геодинамической активности, для установления величин которой необходимы дополнительные измерения в течение продолжительного периода.

Основу деформационных методов оценки напряженно-деформированного состояния горного массива составляет решение обратной геомеханической задачи по замеренным деформациям, вызванным воздействием тех или иных возмущений первоначального поля напряжений. На практике используют целенаправленные перераспределения напряжений, произошедшие вследствие выемки в напряженном массиве полостей с известными формой и размерами: скважин, щелей, выработок, выработанных пространств и пр. При выполнении расчетов предполагается, что имеет место упругое деформирование сплошной однородной и, как правило, изотропной среды с однородным полем первоначальных напряжений.

Для натурных замеров крупномасштабных полей напряжений, соизмеримых с размерами месторождений и горных отводов, в качестве возмущающих полостей рассматриваются карьеры и зоны обрушения от подземных разработок. Упругие деформации окружающего массива определяются по замерам смещений тех реперных пунктов, которые были заранее установлены в пределах будущей области упругого деформирования, т.е. в зоне влияния полости, но вне мульды гравитационного оседания породной толщи. Для этого используются реперы маркшейдерских наблюдательных станций, закладываемые на шахтах и карьерах для мониторинга процессов сдвижения, а также пункты маркшейдерско-геодезической сети и Государственной геодезической сети. В случае Гусевогорского месторождения анализируются сдвижения реперов заложенного в 2010 г. геодинамического полигона, покрывающего своими геодезическими построениями прибортовой массив трех карьеров: Главного, Северного и Западного.

Решение обратной геомеханической задачи осуществляется для условий плоскогорного напряженного состояния по смещениям точек земной поверхности, при этом карьер или зона обрушения аппроксимируются в рассматриваемой напряженной плоскости эллиптическим или, в частном случае, круговым отверстием. В соответствии с принципом суперпозиции, смещения, вызванные выемкой в упругой изотропной плоскости эллиптического отверстия, могут быть представлены как разность между смещениями, обусловленными нагружением плоскости с отверстием, и смещениями, вызванными нагружением плоскости без отверстия. При решении задач геомеханики численные значения векторов смещений для точек земной поверхности определяются на основе функций комплексных переменных Н.И. Мусхелишвили [11 – 12].

Для построения деформационной модели района размещения карьеров ОАО «ЕВРАЗ КГОК» на первом этапе была произведена разбивка исследуемого участка на сеть единичных треугольных элементов, которая была произведена с использованием математического аппарата триангуляции Делоне. Всего построено 46 треугольников, пространственные координаты вершин которых определены с высокой точностью для каждой серии измерений.

Для каждого треугольного элемента были определены

- суммарные сдвижения каждого треугольного элемента как среднее сдвижений реперов, являющихся его вершинами;
- компоненты тензоров горизонтальных деформаций за периоды 2010 – 2011 гг. и 2011 – 2014 гг.
- первый инвариант тензора горизонтальных деформаций как сумма компонент тензоров максимальных деформаций.

На первом этапе исследования закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния горного массива были отстроены векторы собственных движений треугольных элементов, образующих расчетную модель исследуемого участка (рис. 5).

Обращает на себя внимание группировка векторов собственных движений треугольных элементов в кластеры, границы которых во многом совпадают с тектоническими структурами Гусевогорского месторождения. При этом границы кластеров яв-

ляются своеобразным водоразделом, отделяющим самоорганизующиеся блоки с разными направлениями и амплитудами трендовых геодинамических движений.

Каждый крупный кластер (выделены красным, синим и зеленым цветами) так или иначе приурочен к границам соответствующих карьеров, хотя имеются и исключения – северный борт Главного карьера, перешеек между восточным бортом Западного и западным бортом Северного карьера. Один из кластеров (выделен желтым цветом), по всей видимости, приурочен к магистральному тектоническому нарушению в западном борту Западного карьера

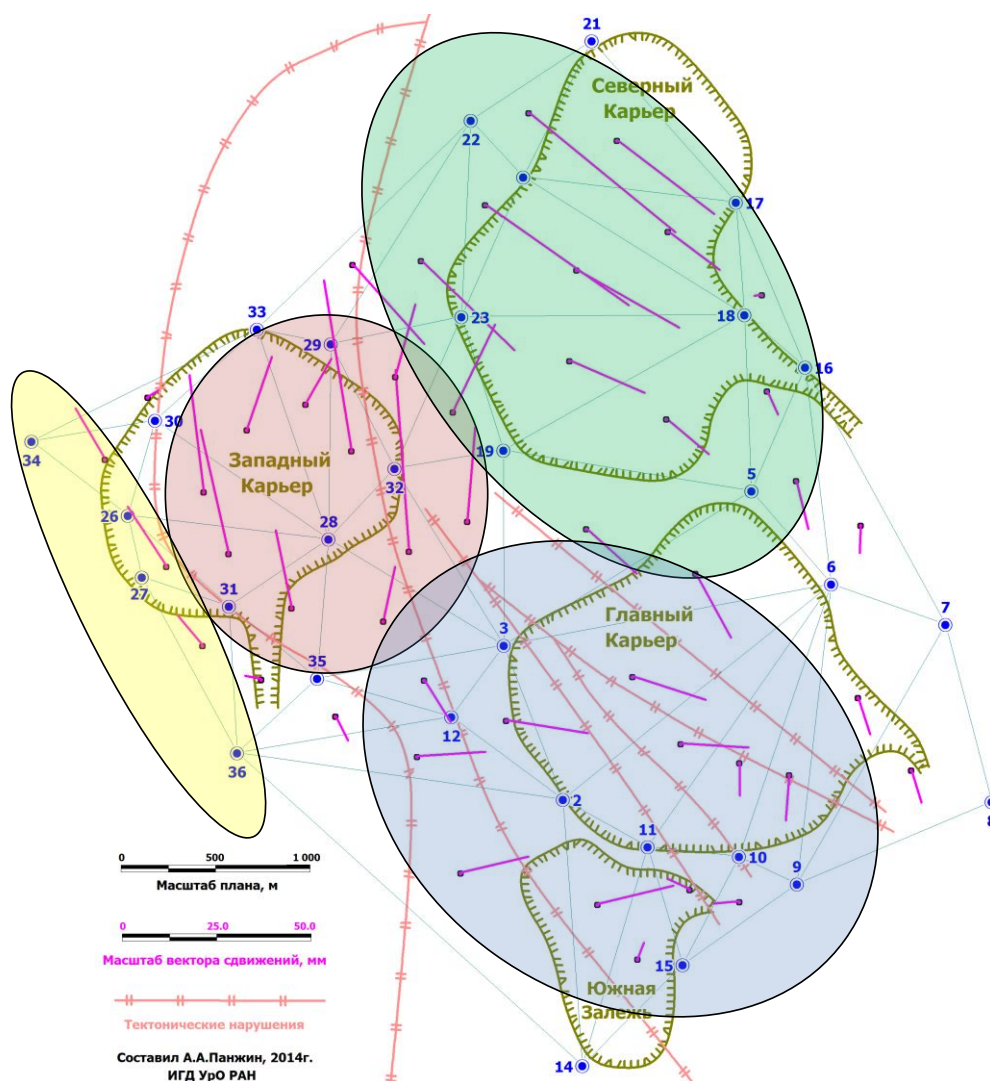


Рис. 5 – Движения единичных треугольных элементов за период 2011 – 2014 гг. и кластеры деформирования

Данные кластеры во многом сохраняют свои границы при смене направления действия трендовых геодинамических движений, произошедших в 2011 – 2014 гг., в период, когда исследования напряженно-деформированного состояния не производились. Однако знакопеременный характер трендовых и циклических деформаций, зафиксированный в ходе выполнения данной работы, дает основание предполагать, что подобные миграции зон концентрации деформации с переполлюсовкой их по направлению действия случаются регулярно. В результате происходит «расшатывание» массива гор-



ных пород и потеря устойчивости бортов в областях концентрации деформаций – зонах высокоградиентных деформаций.

За период 2010 – 2011 гг. происходила концентрация деформаций  $\varepsilon_1$  на перешейке между Западным (восточный борт) и Северным карьером, а также в северном борту Главного карьера; разгрузка (депрессия горного массива) под действием компоненты  $\varepsilon_2$  на юго-восточном борту Западного карьера и северном борту Главного карьера.

В итоге, в восточном борту Западного карьера в период 2010 – 2011 гг. сформировалась высокоградиентная область деформаций, градиент первого инварианта которых  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  составил более  $1,6 \cdot 10^{-4}$ .

В последующий период наблюдений, в 2011 – 2014 гг., происходил во многом обратный процесс: концентрация деформаций  $\varepsilon_1$  мигрировала южнее и дислоцировалась на перешейке между Западным, Северным и Главным карьерами, который одновременно является крупным тектоническим узлом – зоной пересечения восточного магистрального разлома с оперяющими разломами Главного карьера; разгрузка (депрессия горного массива) под действием компоненты  $\varepsilon_2$  произошла на перешейке между Западным (восточный борт) и Северным карьером.

В итоге, в восточном борту Западного карьера в период 2011 – 2014 гг. сформировалась высокоградиентная область деформаций, градиент первого инварианта которых  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$  составил более  $2,6 \cdot 10^{-4}$ .

Таким образом, за период с 2010 по 2014 г. на исследуемом участке были инструментально зафиксированы следующие геодинамические и геомеханические явления:

1. Знакопеременные трендовые геодинамические движения, инициирующие миграцию зон концентрации деформации и «расшатывающие» горный массив.
2. Формирование высокоградиентных областей деформаций в восточном борту Западного карьера, величины которых достигают  $2,6 \cdot 10^{-4}$ .

Для детального изучения вторичного напряженно-деформированного состояния массива горных пород района размещения карьеров ОАО «ЕВРАЗ КГОК» необходимы долговременные регулярные инструментальные наблюдения за трендовой и цикличной геодинамической активностью.

## Литература

1. Современная геодинамика массивов горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / В.Н. Опарин, А.Д. Сашурин, А.А. Панжин и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
2. Sashourin A.D., Panzhin A.A., Kostrukova N.K., Kostrukov O. M. Field investigation of dynamic displacements in zone of tectonic breaking / Rock mechanics - a challenge for society: Proceedings of the ISRM regional Symposium EUROCK. - 2001. - Espoo, Finland / Balkema / Rotterdam / Brookfield. - 2001.
3. Панжин А.А. Роль тектонических нарушений в процессе сдвижения на рудниках Высокогорского ГОКа / А.А. Панжин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 4.
4. Голубко Б.П. Маркшейдерские работы при разработке месторождений открытым способом: учебное пособие / Б.П. Голубко, А.А. Панжин. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. – 155 с.
5. Панжин А.А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях / А.А. Панжин, Н.А. Панжина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 3.

6. Панжин А.А. Решение проблемы выбора опорных реперов при исследовании процесса сдвижения на объектах недропользования / А.А. Панжин // Маркшейдерия и недропользование. - 2012. - № 2. - С.51 – 54.
7. Заключение по деформационному поведению и напряженному состоянию прибортовых массивов карьеров ОАО «ЕВРАЗ КГОК» (х.д. №01/10/326В) / Науч. рук. Яковлев А.В., отв. исп. Ручкин В.И. // ИГД УрО РАН. - Екатеринбург, 2012. - 43 с.
8. Панжин А.А. Исследование гармоник квазипериодических современных деформаций породного массива на больших пространственно-временных базах / А.А. Панжин // Горный информационно-аналитический бюллетень. –2010. – № 9.
9. Панжин А.А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии / А.А. Панжин // Маркшейдерия и недропользование. - 2003. -№ 2(8), апрель-июнь.
10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. База экспериментальных данных о параметрах современных геодинамических движений / Сашурин А.Д., Мельник В.В., Панжин А.А. и др.; заявитель и правообладатель Институт горного дела УрО РАН (ИГД УрО РАН). - №2014620345.
11. Сашурин А.Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии / А.Д. Сашурин. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 262 с.
12. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Основные решения. Плоская теория упругости. Кручение и изгиб / Н.И. Мухелишвили.– М.: Наука, 1966. – 417 с.