

УДК 622.83

ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ “АЛМАЗ-ЖЕМЧУЖИНА” ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

А. А. Панжин, Н. А. Панжина

Институт горного дела УрО РАН,  
E-mail: [panzhin@igduran.ru](mailto:panzhin@igduran.ru), ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия

Рассмотрена задача изучения сдвиганий и деформаций земной поверхности месторождения “Алмаз-Жемчужина” геодезическими методами. Исходной информацией для оценки параметров и закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния послужили наблюдения за современными геодинамическими движениями, выполненные на геодезических знаках технологиями спутниковой геодезии GPS/ГЛОНАСС. Предложенный научный подход и методические положения применения результатов исследования трендовых и циклических геодинамических движений позволили определить параметры природного напряженно-деформированного состояния массива горных пород и районировать территорию по уровню их проявления.

*Современные геодинамические движения, массив горных пород, спутниковая геодезия, тензор деформаций, векторы сдвиганий, мониторинг, районирование*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240209

EDN: GMPTKI

Месторождение хромитовых руд “Алмаз-Жемчужина” находится на территории Республики Казахстан (г. Хромтау) и предполагается к отработке второй очередью шахты “Десятилетие независимости Казахстана”. Оценка природного напряженно-деформированного состояния (НДС) земной поверхности месторождения — задача настоящего исследования. На ее основе выполнено математическое моделирование формирования вторичного НДС рудопородного массива при разной последовательности ведения очистных работ, а также разработаны мероприятия, оптимизирующие технологии управления НДС, устойчивость выработок и массива горных пород, что необходимо для создания методов количественной оценки последствий техногенного изменения недр в процессе их освоения [1, 2].

Современные геодинамические движения — один из факторов, определяющих НДС массива горных пород. Экспериментально доказано, что они имеют сложный характер пространственно-временного распределения и реализуются в виде трендовых и циклических движений [3, 4]. Трендовые движения — взаимные подвижки соседних структурных блоков массива

горных пород с относительно постоянными скоростью и направлением в течение продолжительного промежутка времени, сопоставимого со сроком службы объекта. Циклические движения носят полигармонический характер и слагаются из многочисленных знакопеременных движений с разными частотами и амплитудами перемещения в циклах [5].

Геодинамические движения имеют естественную природу, обусловленную тектоническими подвижками по границам структурных блоков, и техногенную, зависящую от перераспределения напряжений и деформаций в породном массиве под воздействием горных работ, откачки подземных вод и других факторов. Трендовые смещения составляют от 0.5 мм/год для факторов, имеющих естественную природу, до 200 мм/год для техногенных факторов, связанных с ведением горных работ [6]. При этом трендовые смещения, реализующиеся по разломам различных рангов, могут быть инициированы также массовыми технологическими взрывами [7].

Циклические геодинамические движения естественной природы фиксируются в непосредственной близости от тектонических структур и представляют собой полигармонические движения с широким спектром частот и амплитуды возвратных движений. Продолжительность циклов изменяется от нескольких секунд до нескольких месяцев [8].

Измерения по определению компонент трендовой и циклической геодинамической активности проводились с использованием комплекса спутниковой геодезии GPS/ГЛОНАСС, позволяющего с высокой точностью оценить цикловые пространственные координаты реперов маркшейдерско-геодезической сети (наблюдательных пунктов) на земной поверхности. Поскольку очистные горные работы на месторождении “Алмаз-Жемчужина” в настоящее время еще не ведутся, исследовались современные трендовые и циклические геодинамические движения естественной природы.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНДОВЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ**

При исследовании параметров трендовых движений определяются пространственные координаты пунктов маркшейдерско-геодезической сети. При их сопоставлении с ранее полученными исходными значениями фиксируются геодинамические подвижки, происходящие в массиве горных пород за разные периоды времени. Для этого на первом этапе в режиме дифференциальных геодезических GPS/ГЛОНАСС измерений устанавливается вектор — приращение пространственных координат в геоцентрической системе. Между фазовыми центрами двух и более антенн приемников, отцентрированных над пунктами маркшейдерско-геодезической сети, определяются цикловые координаты. На втором этапе совокупность полученных векторов, образующая пространственную сеть, проходит контроль на точность геометрических построений путем определения фактических невязок по замкнутым контурам, и математически строго уравнивается в принятой системе координат с целью центрирования и ориентирования. Для оценки современных геодинамических движений земной поверхности использовались результаты замеров пространственных координат пунктов полигонометрии на площади 15.4 км<sup>2</sup> в непосредственной близости от проекции рудного тела месторождения “Алмаз-Жемчужина” на земной поверхности (рис. 1). Исходные данные натурных GPS/ГЛОНАСС измерений переобрабатывались вновь для указанного участка [9, 10]. При камеральной обработке результатов полевых измерений использовался лицензионный программный комплекс GrafNet/GrafNav. Его особенность — наличие функции совместной прямой и обратной обработки базовых линий, а также использование не только точных эфемерид, но и данных о часах спутника для получения более точных решений.

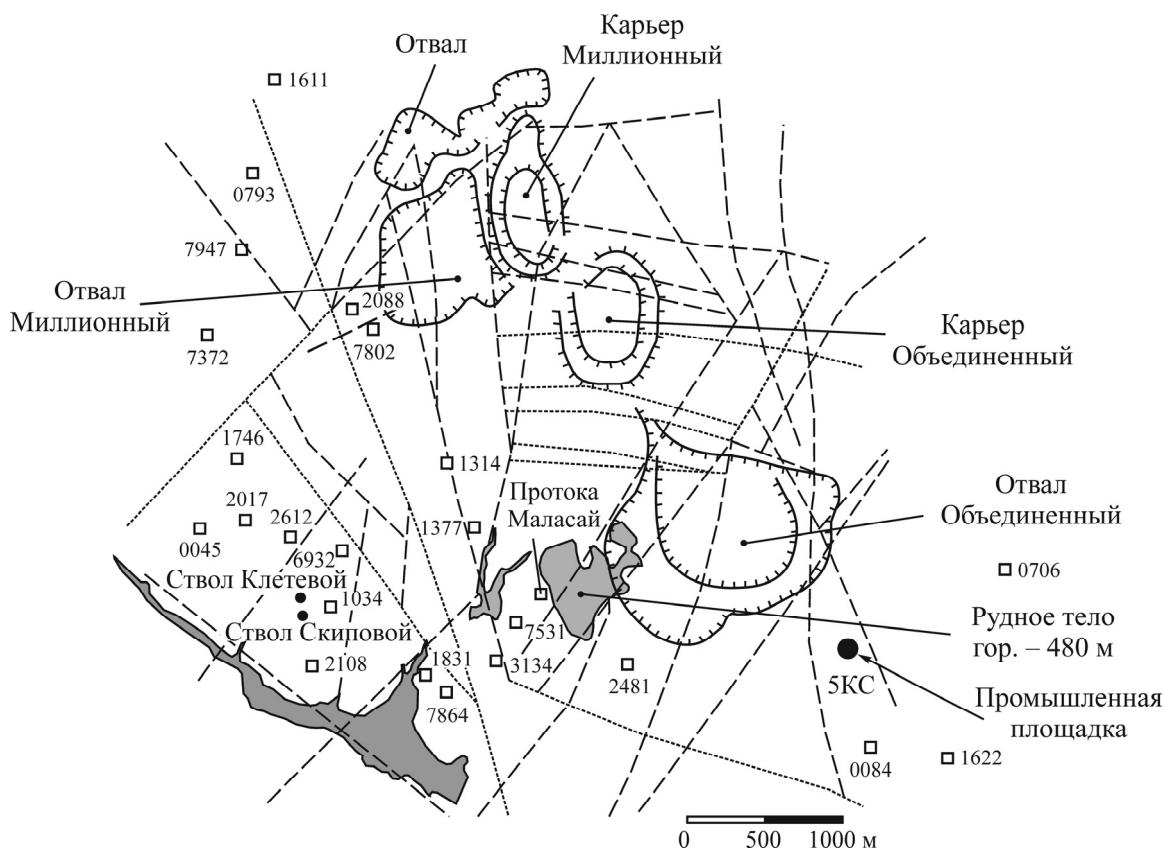


Рис. 1. Схема участка исследований, расположение пунктов полигонометрии и их номера

Выполнено полное переопределение координат маркшейдерско-геодезической сети, представленной пунктами полигонометрии, включающее вычисление векторов между центрами и уравнивание сети в местной системе координат. Уравнивание координат пунктов проводилось в два этапа. После установки векторов — пространственных приращений координат (векторов)  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  между пунктами геодезических сетей осуществлено уравнивание геодезической сети в Государственной системе координат (СК-42, ЦМ = 63) и в системе координат предприятия, которая является стандартной модификацией системы СК-42. Для перехода от всемирной системы геодезических параметров Земли WGS-84 к системе СК-42 использовались параметры, рекомендованные ГОСТ Р 51794-2008. При центрировании сети применялся метод наименьших квадратов, поскольку всем пунктам сети присущи геодинамические движения, что не позволяет выделить условно неподвижные пункты, которые можно принять за опорные.

Трендовые современные геодинамические движения определялись на основе анализа изменений пространственных приращений координат (векторов)  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  наблюдательных пунктов, выполненных в промежутках между повторными циклами измерений. Путем сопоставления исходных координат пунктов за 1985 г. с современными вычислялись сдвиги пунктов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На данном этапе для оценки исходного НДС массива по результатам измерений строились азимут-диаграммы амплитуд горизонтальных сдвигов. Установлено, что сдвиги на исследуемом участке распределены достаточно равномерно. Наблюдается небольшая анизотропия в реализации горизонтальных сдвигов, поскольку в широтном направлении их средний уровень выше. Наименьший уровень горизонтальных сдвигов зафиксирован в субмеридиональном направлении.

Полученные в ходе инструментальных измерений сдвижения наблюдательных пунктов с использованием математического аппарата механики сплошной среды преобразовывались в векторное и тензорное деформационные поля с выделением главных компонентов тензора деформаций. Далее геодинамическая активность территории исследовалась с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Для этого участок разбивался на сеть треугольных элементов. Она полностью покрывала горизонтальную проекцию месторождения “Алмаз-Жемчужина” и прилегающую территорию на площади 15 444.4 тыс. м<sup>2</sup>. В итоге построена вычислительная сеть из 1002 узлов, в 26-ти из которых задавались измеренные сдвижения. В ходе решения геомеханической задачи МКЭ для каждой вершины треугольного элемента определялись величины и направления сдвижений, а также главные компоненты тензоров деформаций по осям *X* (запад – восток), *Y* (север – юг) и сдвиговые деформации *XY*, приводящие к реализации подвижек породного массива по поверхностям ослабления.

На первом этапе получено поле векторов горизонтальных сдвижений. В районе месторождения “Алмаз-Жемчужина” значения векторов небольшие, основные геодинамические движения приурочены к краевым областям участка — на севере, востоке и юге. Наблюдается вихревой (по часовой стрелке) характер формирования поля сдвижений (рис. 2).

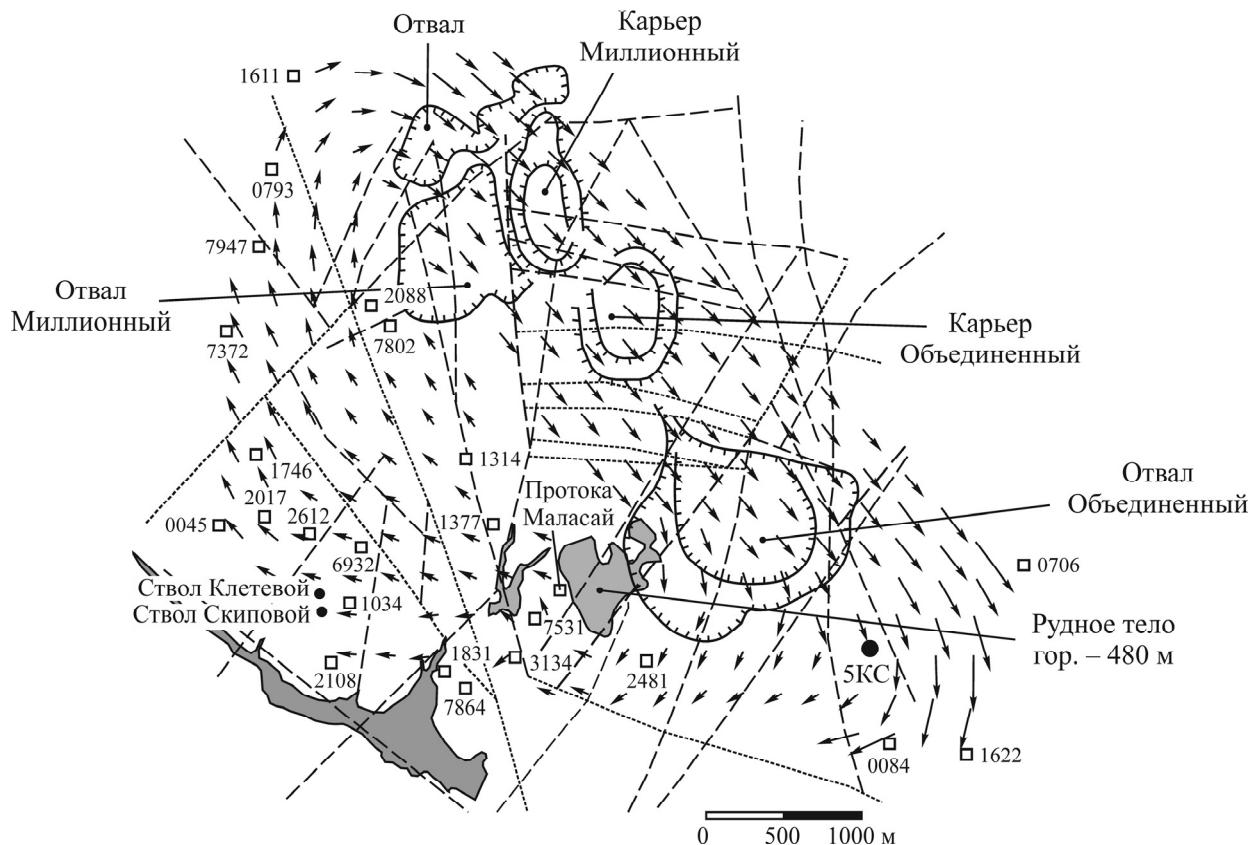


Рис. 2. Векторы горизонтальных сдвижений

В центральной части, в районе горизонтальной проекции месторождения, векторы сдвижений минимальны. Уровень горизонтальных сдвижений в центральной части гораздо ниже, чем в северной и восточной. Сдвижения в районе горизонтальной проекции месторождения не превышают 40 мм.

На втором этапе определялись нормальные деформации  $\varepsilon_{xx}$  (запад–восток); нормальные деформации  $\varepsilon_{yy}$  (север–юг) и сдвиговые деформации  $\varepsilon_{xy}$ . По ним строилось поле главных деформаций в горизонтальной плоскости (рис. 3). Полученные данные о распределении полей сдвигений и деформаций по исследуемой территории позволяют более четко выделить области концентрации деформаций сжатия и растяжения.

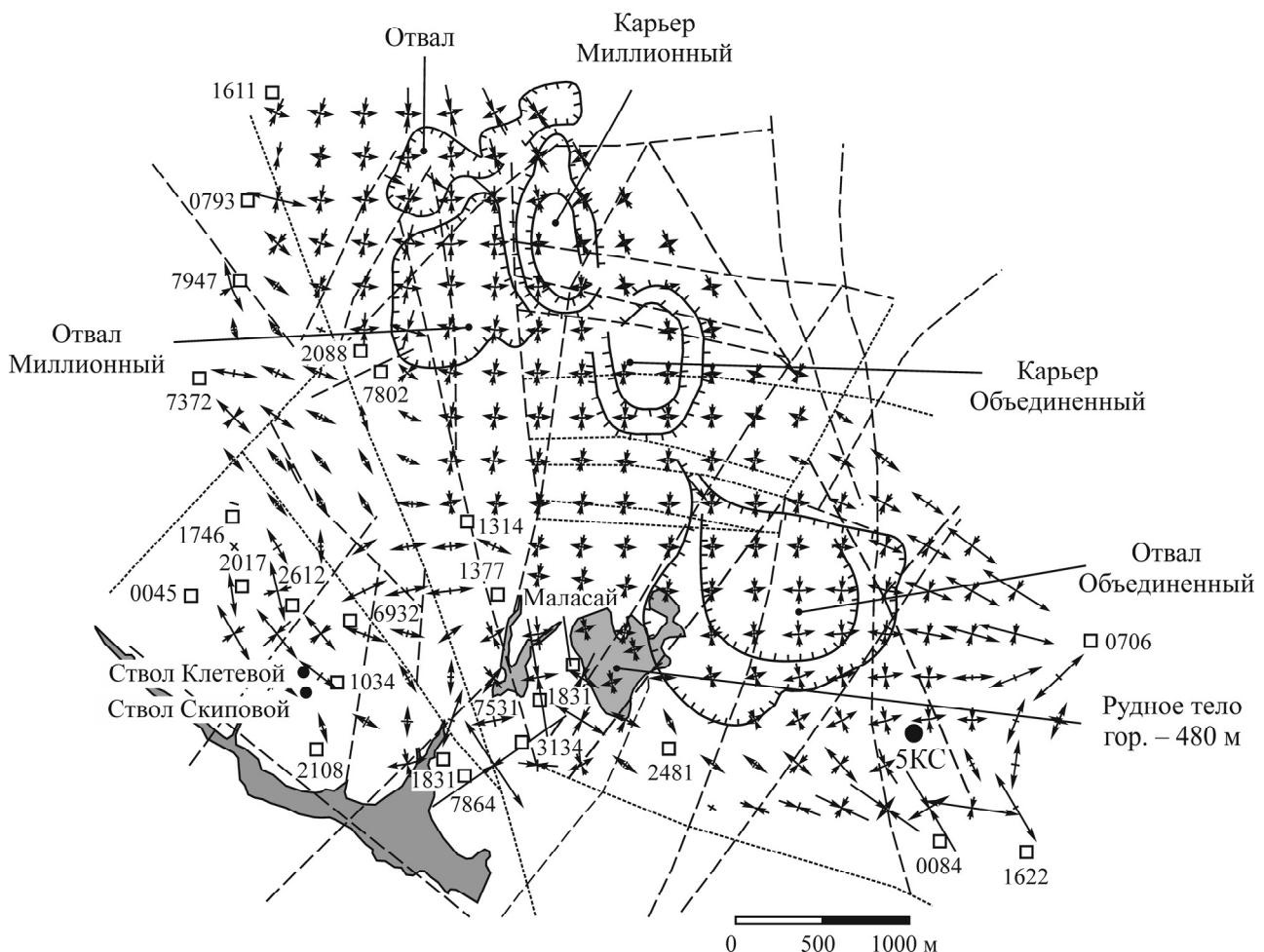


Рис. 3. Распределение главных деформаций в горизонтальной плоскости

Характер распределения поля деформаций на исследуемой территории мозаичный, присутствуют деформации сжатия и растяжений (депрессионные зоны). Выделяются области с повышенными деформациями, их максимальные значения не превышают  $2 \cdot 10^{-4}$ . Основные области концентрации деформаций расположены на севере, западе и востоке исследуемого участка. В западной части растягивающие деформации приурочены к промышленной площадке 5КС, на которой размещены стволы, вскрывающие месторождение, и в районе протоки Маласай. Деформации в районе горизонтальной проекции месторождения “Алмаз-Жемчужина” небольшие ( $2-4 \cdot 10^{-5}$ ). Сдвиговым деформациям массива горных пород при исследовании НДС, как правило, уделяется большое внимание, поскольку они приводят к деформациям в виде подвижек породного массива, в том числе внезапных, по поверхностям ослабления (тектоническим нарушениям). На исследуемой территории области концентрации сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{xy}$  приурочены к юго-восточной части исследуемой территории (район площадки 5КС, деформации  $-2.5 \cdot 10^{-4} \div 2.0 \cdot 10^{-4}$ ) и к восточному берегу протоки Маласай ( $-2.5 \cdot 10^{-4} \div 2.0 \cdot 10^{-4}$ ).

По результатам измерений построено поле дивергенции, которое является одной из характеристик векторного поля сдвигений. Это позволяет дифференцировать области массива по параметру источников и стоков векторного потока: сходящийся векторный поток формирует области преимущественного сжатия, расходящийся — области депрессии [11]. На исследуемом участке источник деформационного поля находится на северо-западе исследуемого участка, сток — на юго-востоке. Имеется локальная неоднородность в юго-западной части, где озеро Джарлы-Бутак соединяется с протокой Маласай. Источники и стоки деформационного поля приурочены к уже отмеченным областям концентрации горизонтальных деформаций. Территория в районе горизонтальной проекции месторождения “Алмаз-Жемчужина” по параметру дивергенции в целом оценивается как спокойная.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧНЫХ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ДВИЖЕНИЙ**

В целях определения параметров циклических геодинамических движений измерения GPS / ГЛОНАСС осуществляются в виде непрерывного многочасового, а в отдельных случаях и многосуточного мониторинга комплексами спутниковой геодезии за системой наблюдательных пунктов. Фиксируются изменение пространственных координат пунктов и компонентов наблюдательной сети посредством инструментальных измерений по методике [12].

Непрерывные наблюдения дискретизируются на интервалы от нескольких секунд до нескольких десятков минут, по которым и оцениваются средние приращения координат. От длительности интервала зависит предел частот циклических движений: чем меньше интервал, тем большие частоты циклов фиксируются измерениями, но при этом уменьшение длительности интервала приводит к снижению точности инструментальных изменений. Непрерывный мониторинг комплексами спутниковой геодезии вне зависимости от частоты дискретизации обеспечивает получение приращений всех трех координат точки расположения прибора в заданный момент времени.

Для определения частот и амплитуд короткопериодных движений использовались и заново обрабатывались исходные данные серии натурных наблюдений, выполненные в [9]. Схема измерений представлена на рис. 4. Экспериментальный участок расположен к западу от горизонтальной проекции месторождения “Алмаз-Жемчужина”. Камеральная обработка полевых измерений проводилась с использованием программного обеспечения (ПО) Waypoint GrafNet / GrafNav, поддерживающего возможности по вычислению кинематических траекторий (в режиме реального времени и в постобработке). Наряду с получением информации от одиночных базовых станций осуществлялась и мультибазовая обработка данных, что многократно повышает надежность и точность спутниковых геодинамических GPS / ГЛОНАСС определений. Выполнялось физическое переформатирование исходных файлов данных формата RINEX путем многовариантной расстановки в них меток начала и окончания дискретных интервалов. Выбор данного ПО обусловлен тем, что используемый в [13] модуль Motion Tracker фирменного обеспечения Trimble Total Control в результате расчетов дает завышенные амплитуды компонент короткопериодной геодинамики, не позволяя четко выделить направления их действия вследствие значительного уменьшения эллиптичности азимут-диаграммы распределения [14].

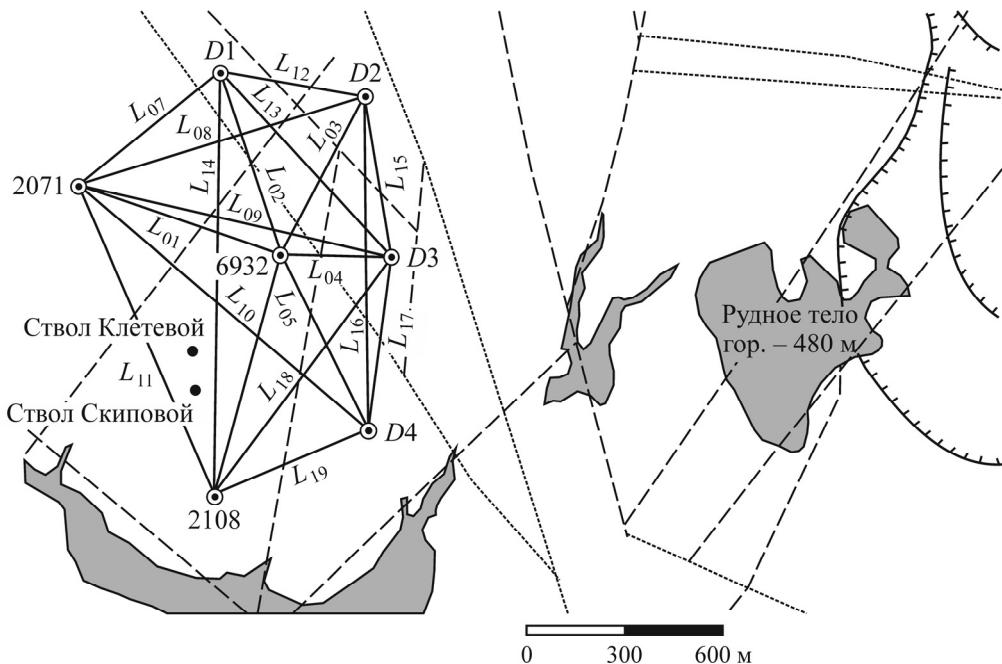


Рис. 4. Схема полигона для исследования короткопериодной геодинамики массива:  $D_1 - D_4$  — наблюдательные пункты;  $L_{01} - L_{19}$  — геометрические связи

В результате предварительной группировки данных выделено 19 линий, по которым устанавливались компоненты короткопериодных движений (север–юг, запад–восток). Обработка выполнялась в трех вариантах измерения: с интервалом 10 мин; 5 мин; с наложенным интервалом. Для каждой линии оценивались среднеквадратичные отклонения (СКО), по которым делались выводы о точности определения компонент короткопериодных движений. Если амплитуда смещений превышала  $\text{СКО} = 3\sigma$ , то наличие короткопериодных движений интервала достоверно. Если амплитуда смещений сопоставима с  $\text{СКО} = 3\sigma$ , то наличие короткопериодных движений интервала возможно.

В ходе исследований по всем трем способам камеральной обработки получены идентичные варианты. Согласно [14], для дальнейшего анализа предпочтительны результаты по третьему способу (дискретные измерения с наложенным интервалом).

Для оценки анизотропии короткопериодных движений массива по результатам измерений строилась азимут-диаграмма их амплитуд (рис. 5). В основном циклические короткопериодные движения на исследуемом участке распределены неравномерно. Выделяются три основных направления: диагональное —  $L_{19}$ , азимут  $67^\circ$  ( $247^\circ$ ),  $\varepsilon = 4.0 \cdot 10^{-6}$ ; субширотное —  $L_{01}$ , азимут  $109^\circ$  ( $289^\circ$ ),  $\varepsilon = 3.3 \cdot 10^{-6}$ ; диагональное —  $L_{05}$ , азимут  $153^\circ$  ( $333^\circ$ ),  $\varepsilon = 3.1 \cdot 10^{-6}$ . Остальные направления на диаграмме не проявляются либо носят близкий к фоновому характер. Зафиксированные циклические геодинамические движения, хотя и имеют сравнительно невысокие амплитуды и деформации, приводят к формированию усталостных эффектов в конструкциях и материалах, расшатыванию массива горных пород. Отмечается формирование новых вскрытий ранее залегенных водопроводящих коллекторов, изменение прочностных свойств грунтов, находящихся в основании инженерных сооружений, проявление эффекта тиксотропии и проч. [15–17]. В то же время в виде короткопериодных циклических геодинамических движений происходит разгрузка массива горных пород, при этом снижается уровень напряженно-деформированного состояния, его трендовой составляющей, препятствуя возникновению событий.

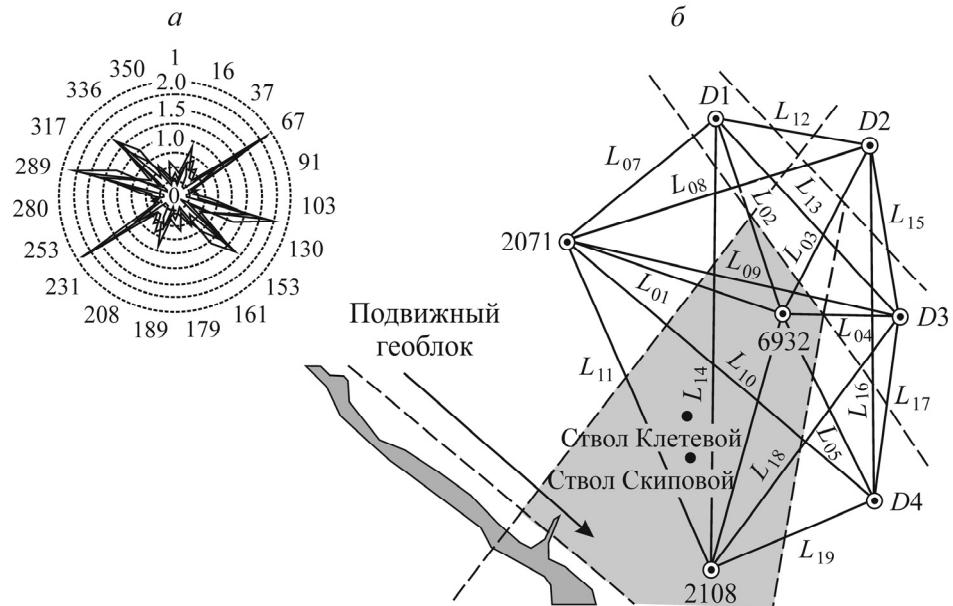


Рис. 5. Азимут-диаграмма распределения сдвигов по осям  $\Delta x$  СЮ,  $\Delta y$  ЗВ и  $\Delta H$  (а) и схема к выделению подвижного геоблока в районе площадки 5КС (б)

В связи с этим возникает необходимость организации регулярного геотехнического мониторинга состояния инженерных сооружений, расположенных в границах подвижного геоблока, в частности надшахтных зданий и сооружений, а также внутренней поверхности стволов “Клетевой” и “Скиповой”, в том числе с помощью лазерного сканирования [18].

Отметим, что приведенный способ реализации циклических короткопериодных деформаций применен при выполнении только одной серии диагностики геодинамической активности массива и, скорее всего, не будет постоянным во времени. В связи с протекающими в реальном массиве горных пород явлениями деструкции и самоорганизации при формировании консолидированных геоблоков неизменно будет меняться и характер межблочного взаимодействия [19].

## ВЫВОДЫ

Территории в районе горизонтальной проекции месторождения “Алмаз-Жемчужина” присущ невысокий уровень геодинамической активности, обусловленный современными геодинамическими движениями. Полученные горизонтальные деформации незначительны, однако это не исключает вероятности их роста или снижения в перспективе, что требует проведения дополнительных исследований. Характер распределения деформаций по рассмотренной площади и его изменения носят мозаичную структуру. На локальных участках формируются зоны концентрации сжимающих деформаций, а также неблагоприятно влияющие на устойчивость массива и подвижек по поверхностям ослабления растягивающие и сдвиговые деформации. Циклические геодинамические движения, хотя и имеют сравнительно невысокие амплитуды, приводят к возникновению усталостных эффектов в массиве горных пород. Концентрация горизонтальных и сдвиговых деформаций в районе протоки Маласай вызывает подвижки по поверхностям ослабления, от чего может зависеть повышенное поступление воды в подземные выработки.

Установлено, что в настоящее время территория площадки 5КС, на которой размещены стволы, вскрывающие месторождение, является активным геоблоком в геодинамическом отношении по фактору короткопериодных движений. Это подтверждается результатами исследований трендовых геодинамических движений, в ходе которых зафиксированы растягивающие деформации, приводящие к раскрытию трещин и поверхностей ослабления с образованием водопроводящих коллекторов и поступлению воды в стволы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балек А. Е., Харисов Т. Ф., Авдеев А. Н.** Обоснование оптимального порядка отработки рудной залежи в условиях высоких напряжений и низкой прочности массива // Горн. журн. — 2023. — № 3. — С. 55–65.
2. **Галченко Ю. П.** Интегральная экологическая оценка геомеханического состояния литосферы при устойчивом развитии минерально-сырьевого комплекса // Горн. журн. — 2024. — № 1. — С. 4–8.
3. **Сашурин А. Д.** Геомеханика в горном деле: фундаментальные и прикладные исследования // Горн. журн. — 2012. — № 1. — С. 29–32.
4. **Коновалова Ю. П.** Особенности учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения ответственных объектов недропользования // Горн. журн. — 2018. — № 6. — С. 6–17.
5. **Коновалова Ю. П., Ручкин В. И.** Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород // ГИАБ. — 2020. — № 3-1. — С. 90–104.
6. **Сашурин А. Д.** Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород // Проблемы недропользования. — 2015. — № 1 (4). — С. 38–44.
7. **Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В.** О влиянии массовых взрывов на устойчивость тектонических разломов // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 49–58.
8. **Панжин А. А.** Пространственно-временной геодинамический мониторинг на объектах недропользования // Горн. журн. — 2012. — № 1. — С. 39–43.
9. **Проведение геомеханических исследований** по определению закономерностей развития напряженно-деформированного состояния приконтурного массива и в бетонной крепи ствола “Скиповой” в процессе начального этапа строительства в интервале до 700 м // Отчет о НИР / ИГД УрО РАН. — Екатеринбург, 2016. — 152 с.
10. **Панжин А. А., Ручкин В. И.** Диагностика современной геодинамической активности массива на шахтах Донского ГОКа // Маркшейдерия и недропользование. — 2013. — № 6 (68). — С. 32–35.
11. **Колмогоров В. Г., Мазуров Б. Т., Панжин А. А.** Алгоритм оценки дивергенции векторных полей движений земной поверхности по геодезическим данным // Геодезия и картография. — 2018. — Т. 79. — № 10. — С. 46–53.
12. **Панжин А. А.** Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии // Маркшейдерия и недропользование. — 2003. — № 2. — С. 43–54.
13. **Panzhin A. and Panzhina N.** Monitoring of the stress-strain state of open pits' adjacent rock mass, E3S Web of Conf., 2020, Vol. 192. — 04017.

14. **Фялковский А. Л.** Обработка данных при геодезическом мониторинге динамических объектов с использованием ГНСС // Инж. изыскания. — 2017. — № 9. — С. 42–52.
15. **Балек А. Е., Харисов Т. Ф.** Выявление геодинамически активных блоковых структур в массивах горных пород // ГИАБ. — 2021. — № 5-2. — С. 30–41.
16. **Озорнин И. Л., Балек А. Е., Харисов Т. Ф.** Формирования нагрузок на крепь шахтных стволов в иерархически блочной среде под влиянием современных геодинамических движений // ГИАБ. — 2020. — № 3-1. — С. 161–169.
17. **Мельник В. В.** Решение проблемы повышенной обводненности руды при ведении очистных работ на шахте “Десятилетие независимости Казахстана” (ДНК) // Проблемы недропользования. — 2021. — № 2 (29). — С. 17–26.
18. **Тарасов В. В., Аптуков В. Н.** Мониторинг деформации бетонной крепи шахтных стволов с помощью лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2022. — № 5. — С. 188–195.
19. **Балек А. Е.** Явление самоорганизации деформационных полей массивов горных пород и его использование при решении задач геомеханики // Проблемы недропользования. — 2016. — № 4 (11). — С. 90–96.

*Поступила в редакцию 06/II 2024*

*После доработки 09/III 2024*

*Принята к публикации 14/III 2024*