

УДК 622.831

**Коновалова Юлия Павловна**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория сдвижения горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [lisjul@mail.ru](mailto:lisjul@mail.ru)

**ИЗМЕНЕНИЕ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ  
ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ  
ДВИЖЕНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ  
ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ\***

*Аннотация:*

Современные геодинамические движения земной коры являются одним из факторов, определяющим напряженно-деформированное состояние массива горных пород и оказывающим негативное влияние на здания, сооружения и объекты инфраструктуры. Параметры геодинамических движений зависят от пространственно-временных масштабов измерительных систем.

В статье представлены исследования по оценке изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием геодинамических движений, полученных с различной временной дискретностью. Установлена взаимосвязь ориентации главных осей тензоров деформаций трендовой составляющей геодинамических движений за длительный промежуток времени и вариационной короткопериодной составляющей, рассчитанных по данным измерений на основе спутниковых методов. Выявленная зависимость дает возможность экспресс-оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород при геодинамической диагностике территорий.

*Ключевые слова:* современные геодинамические движения земной коры, напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, спутниковые методы, главные компоненты тензора деформаций, геодезический пункт, вектор смещения.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.046

**Konovalova Yulia P.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of rock displacement,  
Institute of Mining, UB of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [lisjul@mail.ru](mailto:lisjul@mail.ru)

**THE STRESS-STRAIN STATE CHANGE  
OF ROCK MASS BY IMPACT OF RECENT  
GEODYNAMIC MOVEMENTS  
AT VARIOUS TIME INTERVALS**

*Abstract:*

Recent geodynamic movements of Earth's crust are one of the factors that determine the stress-strain state of rock mass and have a negative impact on buildings, structures and infrastructure. Parameters of geodynamic motions depend on space-time scales of measuring systems.

The article presents research for the stress-strain state change of rock mass by impact of geodynamic movements obtained with different time discreteness. The relationship between the main axis's orientation of strain tensors of the trend geodynamic movements component over a long time period and the variational short-period component calculated from satellite data has been established. The discovered dependence makes it possible to quickly determine the stress-strain state change of rock mass during geodynamic diagnostics of territories.

*Key words:* crustal recent geodynamic movements, stress-strain state, rock mass, satellite methods, main components of strain tensors, permanent benchmark, geodetic benchmark displacement vector.

### Введение

Одним из факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние массива горных пород, являются современные геодинамические движения земной коры. Как показали многочисленные исследования последних двух десятилетий, эти дви-

\* Исследования выполнены в рамках Государственного задания Минобрнауки №075-00412-22 ПР. Тема 3. FUWE-2022-0003, рег. №1021062010536-3-1.5.1.

жения, обусловленные совокупностью природных эндогенных и экзогенных воздействий, происходят в настоящее время и могут оказывать негативные воздействия на здания, сооружения и различные объекты инфраструктуры [1 – 5].

Нормативные документы регламентируют обязательный их учет при проектировании особо ответственных объектов. Поэтому исследования, связанные с их изучением, разработкой методов их регистрации и интерпретации результатов, являются актуальными.

Геодезические методы выступают в роли основных методов изучения современных геодинамических движений. Вертикальная компонента движений надежно и достоверно фиксируется с помощью высокоточного нивелирования. А для исследования горизонтальной составляющей успешно применяются методы спутниковой геодезии. На основе горизонтальных относительных смещений геодезических пунктов производится оценка изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, определяются величины и направления главных нормальных деформаций [6].

Параметры геодинамических движений зависят от пространственно-временных масштабов измерительных систем, что обусловлено иерархически блочным строением массива горных пород и природными процессами, определяющими современное геодинамическое состояние недр как эндогенного, так и экзогенного характера. Так, например, выбор пространственных баз для исследования движений обусловлен рамками решаемых задач, которые могут быть глобального, регионального и локального уровней.

Более сложная ситуация складывается с временными масштабами измерений. Временная дискретность фиксации геодинамических движений (частота опроса) может быть практически любой, вплоть до внутрисуточного масштаба [7 – 10]. В связи с этим в научной литературе современные движения условно подразделяют на *направленную (трендовую)* и *знакопеременную (вариационную)* составляющие. Трендовая составляющая выявляется в процессе многолетних измерений с периодичностью от 0,5 года или однократных повторных наблюдениях через интервал от 10 лет и более, а вариационная составляющая проявляется в виде короткопериодных движений, продолжительность циклов которых укладывается один и более раз в сеанс непрерывных измерений и составляет минуты, часы, сутки. Разработаны методики выявления вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений на малых временных интервалах [11]. Короткопериодные деформации могут в своем максимуме достигать, а иногда и превышать деформации, рассчитанные за многолетний период наблюдений, и оказывать негативное влияние на объекты. Поэтому роль вариационной составляющей значима для безопасности объектов.

Проведенные исследования вариационной составляющей геодинамических движений в ходе непрерывного мониторинга с различной частотой опроса, от 10 минут в течение многочасовых измерений до 14 дней в течение трех лет, показали, что в течение всего мониторингового периода наблюдений имеют место часто встречающиеся направления смещения реперов, превышающие точность их определения. Чаще всего они согласуются с направлением простираения тектонических нарушений [12]. В связи с этим был разработан метод оценки изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений [13] и проведены исследования взаимосвязи деформационных параметров трендовой и вариационной составляющих, которые изложены в данной статье.

#### *Методы исследования*

Исследования взаимосвязи между деформационными параметрами трендовой и вариационной короткопериодной составляющими геодинамических движений основаны на сравнении главных компонент тензора деформаций, определяемых по результа-

там выявленных смещений одних и тех же реперов наблюдательной сети. Поскольку вариационная короткопериодная составляющая движений внутрисуточного масштаба достоверно выделяется только на пространственных базах до 5 – 6 километров, то исследования обеих составляющих ограничены именно этими расстояниями.

Трендовые движения определяются с периодичностью один раз за несколько лет. Смещения реперов, получаемые через 10 – 15-минутные интервалы в результате обработки непрерывного ряда спутниковых измерений, позволяют определить вариационную составляющую движений. Временные интервалы такой длины гарантируют максимальную достоверность и точность результатов при использовании относительного метода позиционирования в режиме статики, в благоприятных условиях, исключая явление переотражения спутниковых сигналов, и частоте их дискретизации не менее 0,5 Гц на базах до 5 – 6 километров, а также применении специализированного научного программного обеспечения для обработки измерений.

Для получения тензорного представления деформационного поля необходимо определить главные компоненты тензора деформаций для каждого треугольного элемента наблюдательной сети, в вершинах которого находятся реперы, для которых определяются смещения через определенные интервалы времени относительно условно неподвижной точки. Разбиение на треугольные элементы может осуществляться как триангуляцией Делоне, так и пересекающимися треугольниками. Для центра тяжести каждого треугольного элемента рассчитываются главные величины тензора деформаций  $\varepsilon_{\max}$  и  $\varepsilon_{\min}$  и угол  $\phi$ , определяющий направление  $\varepsilon_{\max}$  относительно оси  $X$  (отсчитывается против часовой стрелки) (рис. 1). Для их получения могут использоваться различные методики, широко представленные в литературе [14].

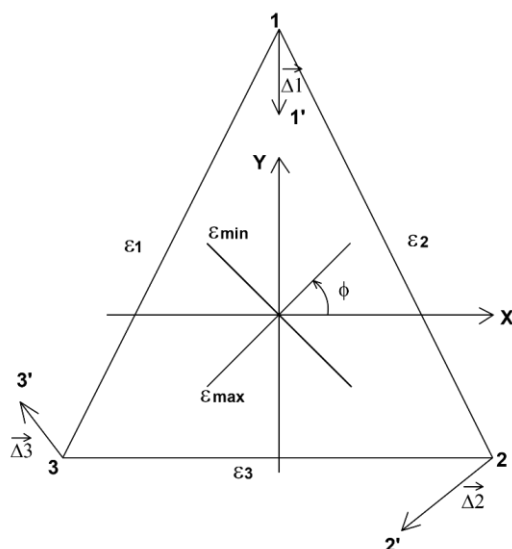


Рис. 1. Схема к определению главных компонент тензора деформаций для треугольного элемента наблюдательной сети

Исходя из того, что вариационная составляющая геодинамических движений формирует в массиве постоянно меняющееся деформационное поле с дискретностью, соответствующей частоте опроса в измерениях, необходимо получить его тензорное представление не просто в конкретный заданный момент времени, а с учетом максимальных смещений (наихудшей ситуации в целях безопасности объектов) и частоты изменения направления вектора смещения за весь сеанс наблюдений. Такой метод разработан и опубликован в работе [13].

Исследования проведены на двух экспериментальных участках – в зоне техногенного влияния на территории Олимпиадинского месторождения и вне ее, на незастроенной территории вблизи г. Рудный (Казахстан). Выбор техногенного участка обу-

словлен наличием интенсификации геодинамических движений, что позволяет сократить период для определения трендовых движений, потому что количество геодезических пунктов, смещения которых можно получить за длительный временной интервал, в пределах 6 километров ограничено.

### Результаты исследования

Наблюдательная сеть на территории Олимпиадинского месторождения состоит из семи реперов (рис. 2), длины между которыми находятся в диапазоне 600 - 4000 метров.

Определены трендовые смещения пунктов за период 6 лет (2010 – 2016 гг.), координаты которых в обеих сериях получены спутниковыми методами. Смещения реперов определены относительно базовой точки АВК, которая привязана к пунктам Международной геодезической сети IGS и пунктам ФАГС в глобальной системе координат ITRF2014 и показала стабильность своего положения. На пунктах сети также проведен непрерывный многочасовой мониторинг с использованием спутниковых систем, в результате которого получены параметры вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений.

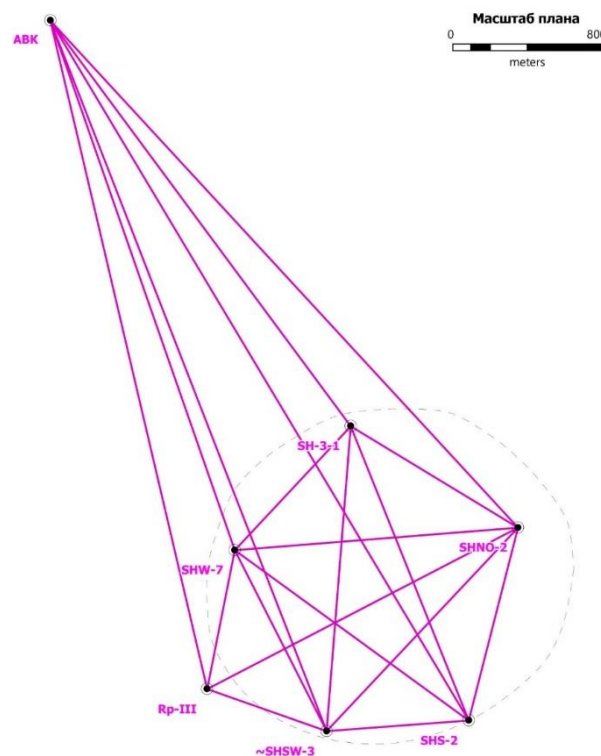


Рис. 2. Схема экспериментальной наблюдательной сети на Олимпиадинском месторождении

На основании полученных векторов смещения трендовой и вариационной составляющих определены деформации для 20 треугольных элементов сети. Главные компоненты тензора деформаций ( $\varepsilon_{\max}$  и  $\varepsilon_{\min}$ ) и угол  $\varphi$ , определяющий направление положения компоненты  $\varepsilon_{\max}$ , приведены в табл. 1, а графическое изображение этих параметров – на рис. 3.

Полученные результаты подтверждают, что максимальные значения горизонтальных деформаций, вызванных вариационной составляющей, могут быть сопоставимы с трендовыми деформациями за 6-летний период. Для трендовых деформаций максимальные компоненты  $\varepsilon_{\max}$  в равной степени носят как растягивающий, так и сжимающий характер, а минимальные компоненты  $\varepsilon_{\min}$  – только

сжимающий. Максимальные компоненты  $\epsilon_{max}$  вариационных деформаций преимущественно все растягивающие, а минимальные  $\epsilon_{min}$  – сжимающие.

Таблица 1

Главные компоненты тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений

номер треуг-ка	Реперы	Деформации (трендовые)			Деформации (вариационные)		
		$\epsilon_{max}$	$\epsilon_{min}$	$\varphi, ^\circ$	$\epsilon_{max}$	$\epsilon_{min}$	$\varphi, ^\circ$
1	~SHSW-3 - SH-1(RpIII) - SHW-7	1,811E-04	-5,156E-05	137	4,064E-05	-8,019E-05	319
2	~SHSW-3 - SHW-7 - SH-3-1	-1,318E-05	-3,984E-04	209	2,626E-05	-1,309E-05	178
3	~SHSW-3 - SH-3-1 - SHNO-2	-1,327E-05	-8,290E-05	151	1,204E-04	-4,970E-06	39
4	~SHSW-3 - SHNO-2 - SHS-2	-1,780E-05	-6,955E-05	39	9,761E-06	-6,650E-06	19
5	SHS-2 - ~SHSW-3 - SH-1(RpIII)	-3,396E-05	-8,561E-05	331	3,983E-05	-6,032E-05	318
6	SHS-2 - SH-1(RpIII) - SHW-7	1,096E-04	-5,422E-05	144	1,254E-05	-1,607E-05	343
7	SHS-2 - SHW-7 - SH-3-1	1,427E-03	-1,851E-04	41	7,835E-05	6,359E-06	137
8	SHS-2 - SH-3-1 - SHW-7	1,199E-05	-5,765E-04	220	5,174E-05	-2,697E-04	222
9	SHNO-2 - ~SHSW-3 - SH-1(RpIII)	2,789E-03	-1,506E-04	139	5,865E-04	-2,218E-05	139
10	SHNO-2 - SH-1(RpIII) - SHW-7	5,657E-05	-1,287E-04	196	-7,978E-06	-1,672E-05	321
11	SHNO-2 - SHW-7 - SH-3-1	-7,078E-05	-5,373E-04	328	1,677E-05	-1,149E-04	322
12	SH-3-1 - SHW-7 - SH-1(RpIII)	6,178E-05	-2,154E-04	175	7,627E-06	-8,223E-05	222
13	SH-3-1 - SH-1(RpIII) - ~SHSW-3	-2,309E-05	-5,906E-05	217	8,559E-05	2,952E-06	40
14	SH-3-1 - ~SHSW-3 - SHS-2	-1,834E-05	-4,255E-05	142	2,706E-05	8,475E-06	162
15	SHW-7 - ~SHSW-3 - SHS-2	4,834E-05	-5,391E-05	144	3,571E-05	5,378E-06	147
16	SHW-7 - SHS-2 - SHS-2	-4,084E-05	-1,841E-04	221	7,346E-06	-3,882E-05	316
17	SH-1(RpIII) - SH-3-1 - SHNO-2	5,326E-04	-9,218E-05	138	6,067E-05	-6,730E-04	225
18	SH-1(RpIII) - SHNO-2 - SHS-2	2,134E-05	-8,131E-05	42	4,529E-05	-1,782E-05	42
19	SH-1(RpIII) - SH-3-1 - SHS-2	-1,722E-05	-8,232E-05	317	1,464E-04	-2,838E-05	140
20	SHW-7 - SHNO-2 - ~SHSW-3	5,156E-05	-1,221E-04	158	5,946E-05	-1,600E-05	149

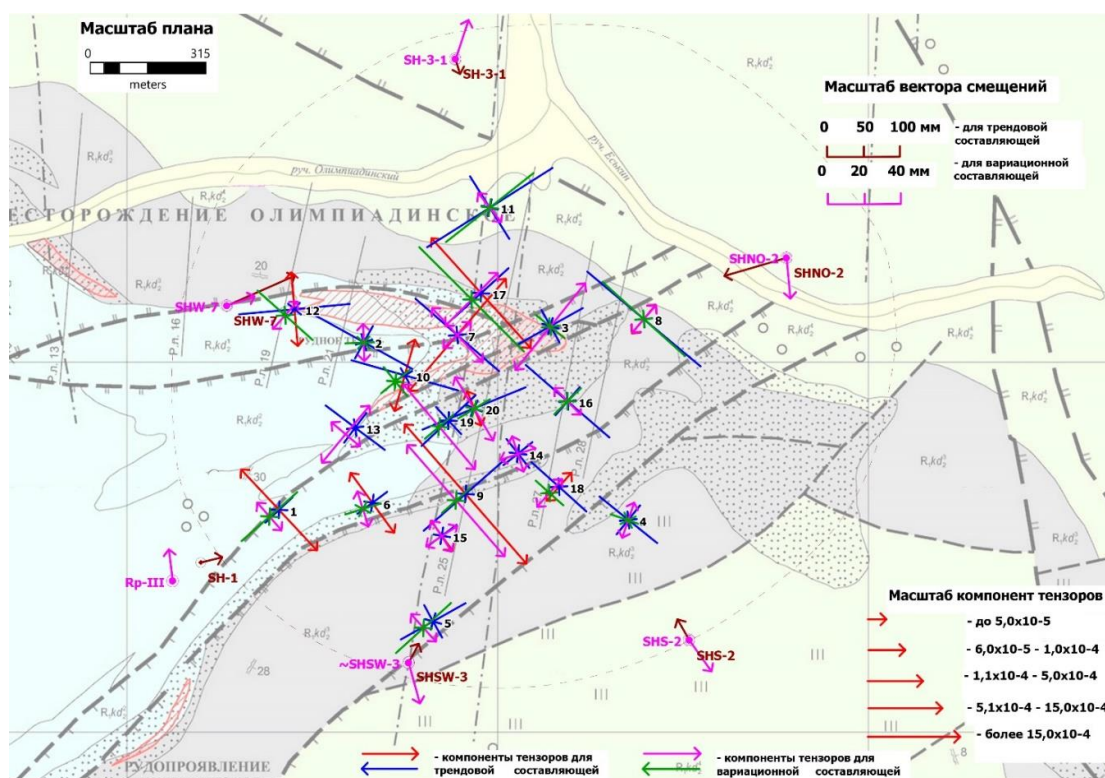


Рис. 3. Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, Олимпиадинское месторождение

Из тензорного представления деформационных полей видно, что направления главных компонент тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих взаимосвязаны. В семнадцати треугольных элементах из двадцати совпадают направления главных компонент тензоров: в 12 треугольниках – в пределах 10 градусов, в 5 треугольниках – в пределах 20 градусов. Из семнадцати совпадающих тензоров тринадцать имеют совпадения в направлении положения компонент  $\epsilon_{\max}$ , а в четырех тензорах – направление компоненты  $\epsilon_{\max}$  для трендовых деформаций совпадает с  $\epsilon_{\min}$  для вариационных и наоборот (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение направлений главных компонент тензоров деформаций

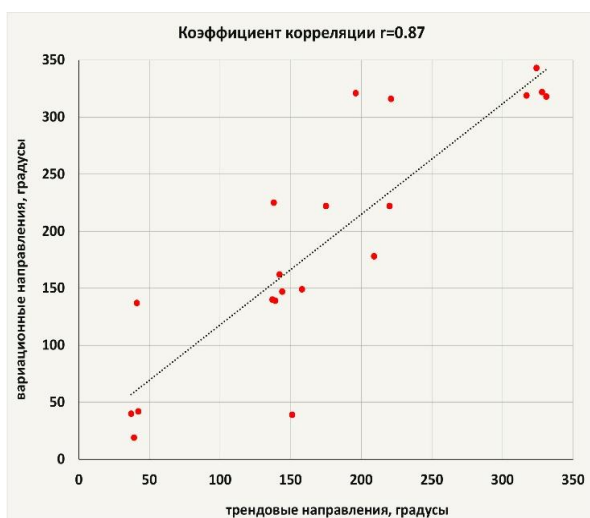
тренд.	317	209	61	39	331	324	131	220	139	196	328	175	37	142	144	311	228	42	137	158
вариаци.	319	178	39	19	318	343	137	222	139	321	322	222	40	162	147	316	225	42	140	149
разность	-2	31	22	20	13	-19	-6	-2	0	-125	6	-47	-3	-20	-3	-5	3	0	-3	9

- не совпадают
  - совпадают при  $\pm 180^\circ$ 
 - совпадают при  $\pm 90^\circ$

Коэффициент корреляции направлений главных компонент тензоров деформаций для двух составляющих движений равен  $r=0,87$ , для случая совпадения только направлений компонент  $\epsilon_{\max}$  (рис. 4 а) и  $r=0,95$ , когда в дополнение учитываются совпадения трендовой  $\epsilon_{\max}$  с вариационной  $\epsilon_{\min}$  и наоборот (рис. 4 б).

Экспериментальная площадка, расположенная в северной части г. Рудный, представлена наблюдательной сетью из пяти пунктов геодезической сети. Были получены трендовые движения пунктов за период 45 лет с 1972 по 2017 г., а также выполнены серии суточных и многочасовых непрерывных спутниковых измерений на этих пунктах. Основным критерием выбора участка являлось отсутствие масштабной техногенной нагрузки на него за прошедший 45-летний период и на современном этапе.

а)



б)

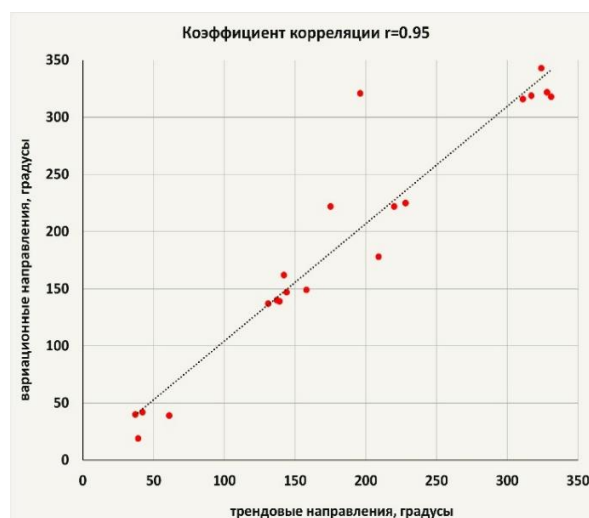


Рис. 4. Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинимических движений

Полученные графические результаты сравнения приведены на рис. 5, а числовые параметры тензоров деформаций в табл. 3.

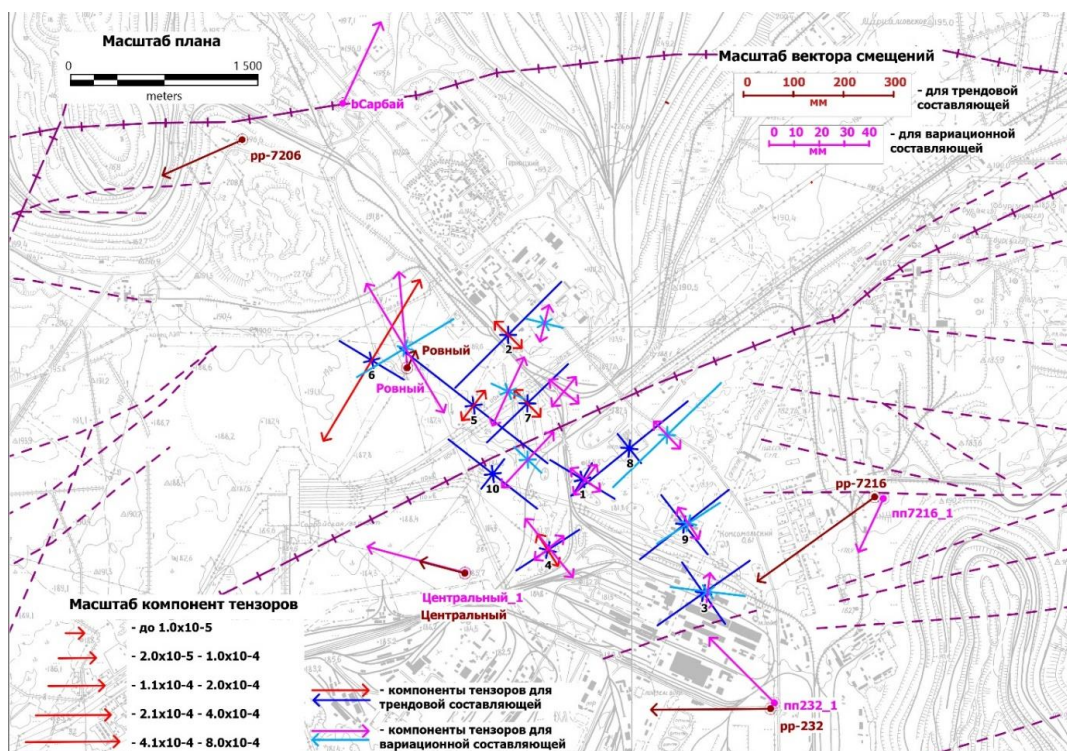


Рис. 5. Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный, Казахстан

Таблица 3

Главные компоненты тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный, Казахстан

номер треуг-ка	Реперы	Деформации (трендовые)			Деформации (вариационные)		
		$\epsilon_{max}$	$\epsilon_{min}$	$\varphi, ^\circ$	$\epsilon_{max}$	$\epsilon_{min}$	$\varphi, ^\circ$
1	pp7216 - Центральный - Ровный	-1,060E-05	-7,003E-05	211	1,451E-05	1,089E-06	217
2	pp7216 - Ровный - pp7206(бСарбай)	1,544E-05	-2,538E-04	315	1,086E-05	-7,301E-06	14
3	pp232 - pp7216 - Центральный	-4,717E-05	-1,307E-04	325	8,628E-06	-2,414E-05	7
4	pp232 - Центральный - Ровный	1,393E-05	-4,731E-05	147	2,942E-05	1,368E-06	141
5	pp232 - Ровный - pp7206(бСарбай)	1,193E-05	-7,739E-04	218	2,578E-05	-7,138E-06	25
6	pp7206(бСарбай) - Ровный - Центральный	4,298E-04	-1,690E-05	31	3,820E-04	-1,999E-04	329
7	pp7206(бСарбай) - Центральный - pp7216	9,614E-06	-2,025E-04	316	1,234E-05	7,252E-07	39
8	pp7206(бСарбай) - pp7216 - pp232	-9,231E-07	-3,142E-04	321	5,322E-06	-2,192E-04	316
9	Ровный - pp7216 - pp232	-3,522E-05	-1,929E-04	322	9,633E-06	-6,359E-05	327
10	Центральный - pp7206(бСарбай) - pp232	-1,287E-05	-1,204E-04	218	2,456E-05	-3,410E-06	43

Направления главных осей тензоров деформаций для двух составляющих геодинамических движений совпадают в пределах  $10^\circ$  в семи треугольных элементах из десяти: шесть совпадений по  $\epsilon_{max}$  и одно совпадение  $\epsilon_{min}$  для трендовой составляющей с  $\epsilon_{max}$  для вариационной составляющей движений. В трех треугольниках совпадения компоненты  $\epsilon_{min}$  трендовых движений с компонентой  $\epsilon_{max}$  для вариационных движений находятся в диапазоне  $28 - 48^\circ$  (табл. 4). Описанные взаимосвязи направлений главных компонентов тензоров деформаций для двух составляющих движений описываются коэффициентом корреляции  $r=0,99$  (рис. 6).

Таблица 4

Сравнение направлений главных компонент тензоров деформаций

тренд.	211	45	55	147	38	301	46	321	322	38
вариан.	217	14	7	141	25	329	39	316	327	43
разность	-6	31	48	6	13	-28	7	5	-5	-5

- совпадают при  $\pm 180^\circ$

- совпадают при  $\pm 90^\circ$

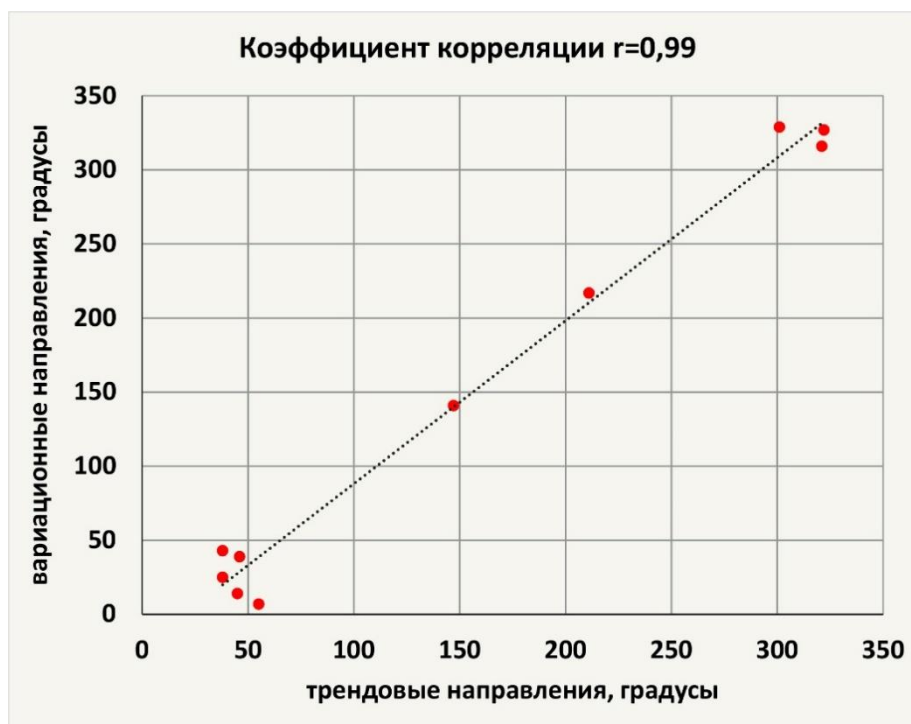


Рис. 6. Корреляционное поле направлений главных компонент тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный

Таким образом, сравнение параметров двух составляющих геодинамических движений на одинаковых пространственных базах до шести километров показало, что вариационная составляющая в своем максимуме может быть сопоставима с параметрами трендовых движений, а следовательно, деформационные поля, формируемые ею, при оценке геодинамической безопасности территорий должны приниматься в рассмотрение.

Установлена взаимосвязь с коэффициентом корреляции  $r$ , равным  $0,87 - 0,99$ , ориентации главных осей тензоров деформаций трендовой составляющей геодинамических движений за длительный промежуток времени и вариационной короткопериодной составляющей, рассчитанных по данным измерений на основе спутниковых методов. Данная взаимосвязь объясняется тем, что вариационные короткопериодные смещения происходят вдоль тренда, и, как показали исследования, частота отклонения репера за сеанс непрерывных измерений зачастую повышена в направлении тренда. Именно по частоте отклонения определяется преобладающий вектор смещения под воздействием вариационных движений [13].

#### Заключение

Выявленная зависимость в ориентации тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющей движений дает возможность экспресс-оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород, что особенно эффективно при геодинамической диагностике территорий, на которых отсутствует возможность определения трендовых движений за длительный промежуток времени. Знание направлений главных величин тензора деформаций является важным моментом с точки зрения безопасного размещения объектов недропользования, поскольку сооружение, оси которого расположены вдоль главных линейных компонент тензора, не будет испытывать сдвиговых деформаций. Таким образом, учет временной изменчивости деформационных полей помогает избежать ошибок при выборе



безопасных площадок для размещения объектов в условиях иерархической блочности и постоянной подвижности массива горных пород.

### Список литературы

1. Сашурин А.Д., 2011. Геодинамические истоки крупнейших природно-техногенных катастроф. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 13-37.
2. Сашурин А.Д., Панжина Н.А., 2010. Влияние земных разломов на прочностные характеристики зданий и сооружений. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*, № 1, С. 64-67.
3. Kuzmin Yu.O., 2016. Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, Vol. 52, № 5, P. 709-722.
4. Учитель И.Л., 2010. *Разрушительные свойства геодеформаций*. Одесса: Астропринт, 222 с.
5. Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т., 2010. *Краткие очерки практической микрогеодинамики*. Санкт-Петербург: Питер, 175 с.
6. Панжин А.А., 2008. Определение тензора деформаций для исследования параметров процесса сдвига в трехмерном пространстве. *Маркшейдерия и недропользование*, №2(34), С. 64-66.
7. Seco A., Tirapu F., Ramirez F. et al., 2007. Assessing building displacement with GPS. *Building and environment*, Vol. 42, № 1, P. 393-399.
8. Yi T. H., Li H. N., Gu M., 2013. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Structural control and health monitoring*, Vol. 20, Issue 5, P. 649-670.
9. Murray-Moraleda J., 2011. GPS: applications in crustal deformation monitoring. *Extreme Environmental Events. Complexity in Forecasting and Early Warning*, Springer New York, Vol. 1, P. 589-622.
10. Nickitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S., 2006. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, Vol. 28, Iss. 10, P. 1471-1482. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.02.001
11. Панжин А.А., 2003. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии. *Маркшейдерия и недропользование*, № 2, С. 43-54.
12. Коновалова Ю.П., 2018. Исследование закономерностей деформационных процессов в массиве горных пород для оценки площадок размещения ответственных объектов недропользования. *Известия Уральского государственного горного университета*, №3(51), С.98-107. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-98-107.
13. Коновалова Ю.П., Ручкин В.И., 2020. Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 3-1, С. 90-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104.
14. Безухов Н.И., 1961. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. Москва: Высшая школа, с. 537.

### References

1. Sashurin A.D., 2011. Geodinamicheskie istoki krupneishikh prirodno-tekhnogennykh katastrof [Geodynamic origins of the largest natural and man-made disasters]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 13-37.

2. Sashurin A.D., Panzhina N.A., 2010. Vliyanie zemnykh razlomov na prochnostnye kharakteristiki zdaniy i sooruzhenii [Influence of Earth faults on the strength characteristics of buildings and structures]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN*, № 1, P. 64-67.
3. Kuzmin Yu.O., 2016. Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, Vol. 52, № 5, P. 709-722.
4. Uchitel' I.L., 2010. Razrushitel'nye svoystva geodeformatsii [Destructive properties of geodeformations]. Odessa: Astroprint, 222 p.
5. Selyukov E.I., Stigneeva L.T., 2010. Kratkie ocherki prakticheskoi mikrogeodinamiki [Brief sketches of practical microgeodynamics]. Sankt-Peterburg: Piter, 175 p.
6. Panzhin A.A., 2008. Opredelenie tenzora deformatsii dlya issledovaniya parametrov protsessa sdvizheniya v trekhmernom prostranstve [Determination of the strain tensor for the study of the parameters of the displacement process in three-dimensional space]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, №2(34), P. 64-66.
7. Seco A., Tirapu F., Ramirez F. et al., 2007. Assessing building displacement with GPS. *Building and environment*, Vol. 42, № 1, P. 393-399.
8. Yi T. H., Li H. N., Gu M., 2013. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Structural control and health monitoring*, Vol. 20, Issue 5, P. 649-670.
9. Murray-Moraleda J., 2011. GPS: applications in crustal deformation monitoring. *Extreme Environmental Events. Complexity in Forecasting and Early Warning*, Springer New York, Vol. 1, P. 589-622.
10. Nikitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S., 2006. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, Vol. 28, Iss. 10, P. 1471-1482. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.02.001
11. Panzhin A.A., 2003. Issledovanie korotkoperiodnykh deformatsii razlomnykh zon verkhnei chasti zemnoi kory s primeneniem sistem sputnikovoi geodezii [Investigation of short-period deformations of fault zones of the upper part of the Earth's crust using satellite geodesy systems]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, № 2, P. 43-54.
12. Konovalova Yu.P., 2018. Issledovanie zakonomernostei deformatsionnykh protsessov v massive gornykh porod dlya otsenki ploshchadok razmeshcheniya otvetstvennykh ob"ektov nedropol'zovaniya [Study of the patterns of deformation processes in the rock mass for the assessment of sites for the placement of responsible subsurface use facilities]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, №3(51), P. 98-107. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-98-107.
13. Konovalova Yu.P., Ruchkin V.I., 2020. Otsenka vliyaniya korotkoperiodnykh geodinamicheskikh dvizhenii na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie massiva gornykh porod [Assessment of the effect of short-period geodynamic movements on the stress-strain state of a rock mass]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, № 3-1, P. 90-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104.
14. Bezukhov N.I., 1961. Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti [Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep]. Moscow: Vysshaya shkola, p. 537.