

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](mailto:panzhin@igduran.ru)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ\*

Аннотация:

Приведены методика и результаты экспериментального исследования современных геодинамических движений с использованием данных деформационного мониторинга и связанные с ними вопросы моделирования природных, техногенных и экологических систем. Параметры современных геодинамических движений вычисляются путем определения разности между пространственными координатами наблюдательных пунктов, полученными методами спутниковой геодезии от международных геодезических сетей.

Обозначены основные положения методики визуализации геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений, что позволяет обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы. На основании экспериментальных данных установлен вихревой характер современных геодинамических движений как индикатор активных тектонических нарушений. При этом важной характеристикой векторного поля геодинамических движений является дивергенция, которая характеризует степень сходимости или расходимости векторного потока.

Показано, что в качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов смещений наблюдательных пунктов, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Это позволяет в условиях действующих горнодобывающих предприятий решить проблему утраты реперов наблюдательной станции за счет частичной ротации реперов вследствие восстановления уничтоженных и добавления новых в геодезические построения.

Поставлены задачи дальнейших исследований, включающие решение вопроса о возможности повышения оперативности получения результатов геодинамических исследований за счет использования в расчетах точных эфемерид разного класса, а также решение вопроса о выборе минимально возможного интервала между цикловыми сериями инструментальных измерений, при котором погрешности единичных измерений будут оказывать минимальное влияние на результат определения скоростей современных геодинамических движений.

Ключевые слова: геодинамические движения, деформации, мониторинг, визуализация, геологические структуры, векторное поле, дивергенция.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.032

**Panzhin Andrey A.**

Candidate of Technical Sciences,  
Scientific Secretary,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiriyaka Str.  
e-mail: [panzhin@igduran.ru](mailto:panzhin@igduran.ru)

### EXPERIMENTAL RESEARCH AND VISUALIZATION OF CONTEMPORARY GEODYNAMIC MOVEMENTS

Abstract:

Methods and results of experimental research of modern geodynamic movements using strain monitoring data, and related issues of modeling natural, man-made and ecological systems are presented. The parameters of the current geodynamic movements have been calculated by determining the difference between the spatial coordinates of observation points obtained by satellite geodesy methods from international geodetic networks.

The paper outlines main provisions of the technique for visualizing geodynamic movements based on the results of cyclic geodetic measurements, which makes it possible to reasonably identify active geological structures, blocks and tectonic faults. Based on experimental data, it establishes the vortex character of modern geodynamic movements as an indicator of active tectonic disturbances. An important characteristic of the vector field of geodynamic movements is divergence, which characterizes the degree of convergence or divergence of the vector flow.

We show that as a key source of information about geodynamic movements carried out on large space-time bases, it is advisable to use not the absolute values of the displacement vectors of observation points, but their velocities reduced to the annual cycle. This allows, in terms of existing mining enterprises, to solve the problem of loss of reference points of the observation station, by the partial rotation of the landmarks due to the restoration of destroyed and adding new ones in the geodetic construction.

The tasks for further research are set, including: solving the question of possibility to increase the efficiency of obtaining the results of geodynamic studies by using accurate ephemerides of different classes in calculations, as well as solving the question of choosing the minimum possible interval between the cyclic series of instrumental measurements, in which the errors of individual measurements will have a minimal impact on the result of determining the speeds of current geodynamic movements.

Key words: geodynamic movements, deformations, monitoring, visualization, geological structures, vector field, divergence.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019

### *Введение*

Вопрос возможности исследования современных геодинамических движений с использованием данных деформационного мониторинга, проводимого как в режиме дискретных наблюдений на пунктах геодезической сети (ГГС), так и с использованием данных постоянно действующих станций (GNSS), неоднократно рассматривался в связи с исследованием современной геодинамики Уральского региона, вызванной как естественными, так и техногенными факторами [1, 2].

Определение цикловых пространственных координат наблюдательных пунктов и их изменений во времени осуществляется, в зависимости от размеров сетей, методами Precise Point Positioning (PPP) [3] для больших сетей и классическими методами Double Difference (DD) для локальных сетей. Также методы PPP и DD могут использоваться в комбинации, при этом методами DD производится расчет и уравнивание геодезической сети, а методом PPP – привязка локальных и региональных геодезических построений к международной сети IGS.

Важным аспектом при исследовании и визуализации современных геодинамических движений является моделирование природных, техногенных и экологических систем, которое позволяет выявить многие необходимые для их анализа свойства и характеристики, в том числе скрытые закономерности их пространственно-временного распределения. При этом многое зависит от исследования, адекватного объекту и его компонентам: идентификации и визуализации как количественной, так и качественной пространственно-временной информации [4].

Также визуализация геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений позволяет более обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы, что необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и принятия профилактических мер для обеспечения безопасности населения, промышленных объектов и др.

### *Методика исследований*

Исследования современных геодинамических движений в представленной работе осуществлялись на Воронежском кристаллическом массиве (ВКМ) с использованием данных деформационного мониторинга, проводимого постоянно действующими станциями GNSS на территории региона (рис. 1). Чтобы иметь возможность проследить и оценить вероятную связь современных геодинамических движений с тектоническим строением региона, на рис. 1 совмещено размещение пунктов GNSS с основными разломами региона, отмечаемыми фондовыми геологическими материалами.

Также на исследуемом участке зафиксирован эпицентр сейсмического события, отнесенного к природным землетрясениям. Магнитуда землетрясения, произошедшего 31.03.2000, составила 3,9, глубина очага 10 км. По последствиям землетрясения такой магнитуды не представляют серьезной опасности, но они, являясь динамической реализацией предшествующих деформационных процессов, в определенной мере характеризуют современную геодинамическую активность района.

Всего на исследуемой территории, на площади размерами 200×300 км, расположено 18 пунктов GNSS, которые производят накопление данных, что позволяет выполнить их высокоточную геодезическую привязку к общемировой сети IGS в режиме цикловых мониторинговых измерений.

В работе [5] показано, что в качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях по результатам мониторинговых измерений, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений пунктов GNSS и реперов наблюдательных станций, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Приведение скоростей к годовому циклу необходимо при проведении мониторинговых измерений по нерегулярным

по времени цикловым измерениям для приведения результатов к общей пространственно-временной базе.

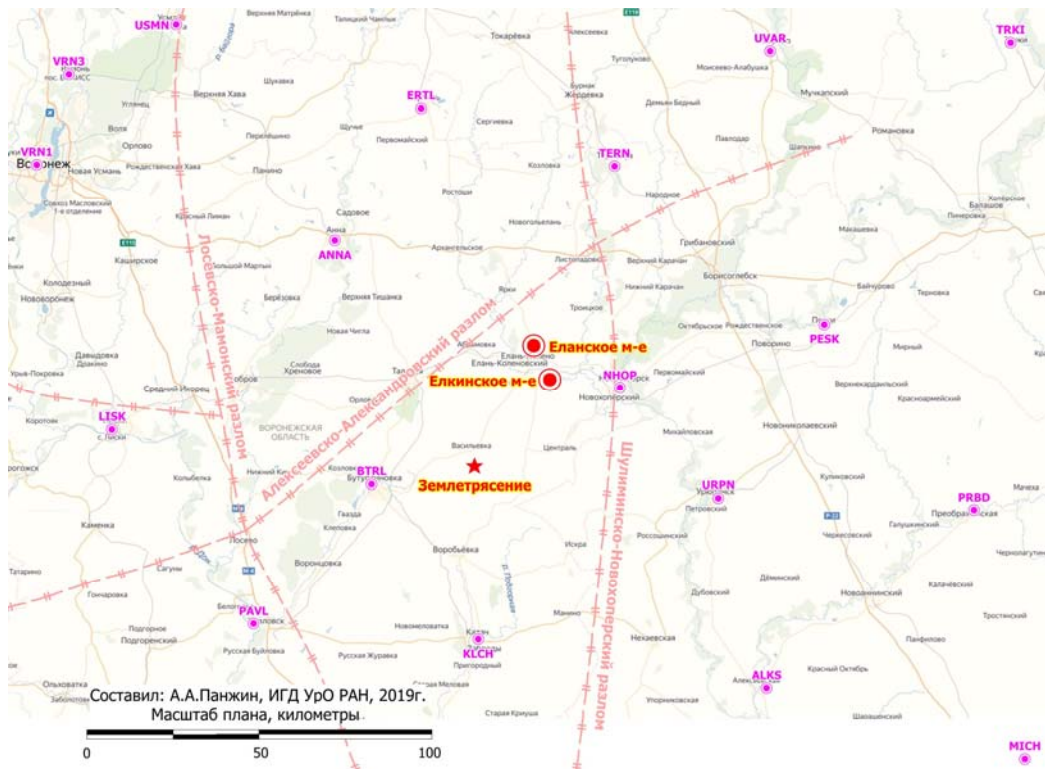


Рис. 1 - Ситуационная карта расположения станций GNSS, по которым определялись современные геодинамические движения

### *Результаты исследований*

Годовые скорости векторов трендовых движений пунктов были определены на основе анализа изменений их пространственных приращений координат  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ , происшедших в промежутках между повторными циклами измерений (табл. 1), и представлены на рис 2. Направления и величины векторов достаточно однородны, что отражает общее, преимущественно восточное трендовое направление литосферной плиты, включающей ВКМ.

Как видно из табл. 1, на исследуемом участке, на фоне трендовой составляющей также отмечается неоднородность скоростей геодинамических движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях по результатам мониторинговых измерений, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений пунктов GNSS и реперов наблюдательных станций, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Это необходимо при проведении мониторинговых измерений по нерегулярным по времени цикловым измерениям для приведения результатов к общей пространственно-временной базе.

Также анализ скоростей геодинамических движений, а не их абсолютных значений, целесообразно использовать при исследовании процесса сдвижения при подземной и открытой разработках месторождений полезных ископаемых, поскольку в условиях действующего горнодобывающего предприятия возникает проблема утраты реперов наблюдательной станции. Это приводит к частичной ротации реперов вследствие восстановления уничтоженных и добавления новых в геодезические построения. При этом сопоставление абсолютных величин сдвижений и деформаций, полученных в раз-

личные периоды времени, будет некорректным при использовании традиционных алгоритмов оценки и анализа деформационного состояния массива.

Таблица 1

Геодинамические движения пунктов GNSS за период наблюдений  
20.03.2019 – 09.10.2019 (203 суток)

Станция GNSS	Координаты станции		Геодинамические движения, мм/год				
	B (широта)	L (долгота)	$\Delta B$	$\Delta L$	$\Delta H$	2D	3D
PESK	51°15'13"	42°27'25"	11.3	27.8	21.0	30.0	36.6
NHOP	51°05'28"	41°36'24"	3.7	39.0	23.9	39.2	45.9
TERN	51°41'07"	41°35'34"	6.8	34.1	4.9	34.8	35.1
MIHA	50°04'49"	43°13'53"	8.3	30.0	4.2	31.1	31.4
PAVL	50°27'39"	40°05'55"	4.1	34.6	5.4	34.9	35.3
VRN3	51°55'07"	39°17'45"	6.5	37.8	-1.2	38.3	38.3
ALKS	50°17'06"	42°11'21"	7.4	38.7	12.5	39.4	41.3
ANNA	51°29'07"	40°25'21"	14.1	32.2	15.0	35.1	38.2
BTRL	50°50'09"	40°34'41"	14.8	42.2	5.4	44.8	45.1
ERTL	51°50'24"	40°46'53"	5.2	34.8	3.6	35.2	35.4
KLCH	50°25'22"	41°01'00"	9.3	35.0	5.4	36.2	36.6
LISK	50°58'21"	39°30'22"	7.8	35.8	-2.4	36.6	36.7
PRBD	50°44'56"	43°03'21"	6.3	40.9	0.6	41.4	41.4
TRKI	51°59'33"	43°16'19"	5.6	41.2	6.0	41.5	42.0
URPN	50°47'42"	42°00'22"	6.1	29.9	hurr	30.5	hurr
USMN	52°03'29"	39°44'43"	7.8	35.8	3.0	36.6	36.7
UVAR	51°59'10"	42°15'22"	6.5	36.7	13.3	37.2	39.5
VRN1	51°40'36"	39°10'13"	8.7	39.5	7.8	40.5	41.2

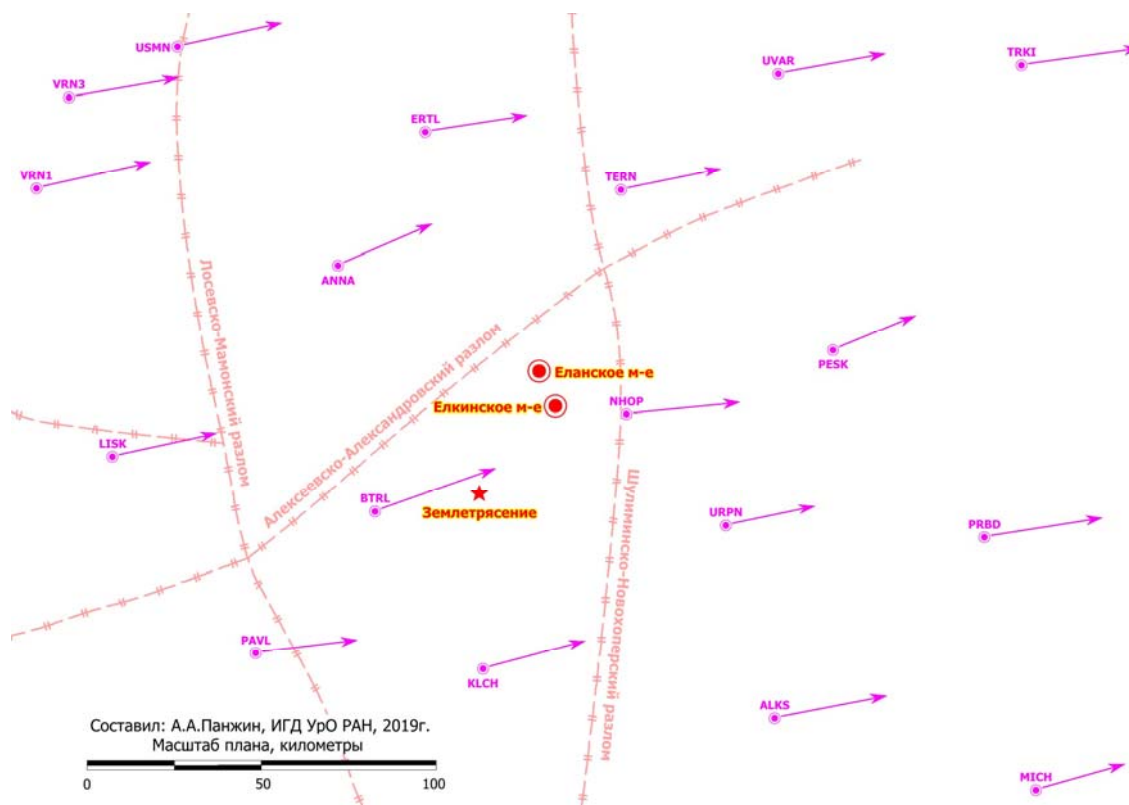


Рис. 2 – Векторы трендовых горизонтальных современных геодинамических движений

В результате для каждой серии цикловых измерений определяются изменения пространственных приращений координат  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  пунктов, которые для случая ВКМ имеют преимущественно восточное направление за счет трендовой составляющей. При этом векторное поле деформаций визуализируется практически однородным, что не позволяет качественно идентифицировать пространственно-временную информацию о геодинамических движениях. Для числовой фильтрации трендовой составляющей применялся метод наименьших квадратов с наложением условия математического минимума квадратов векторов сдвижений по каждой оси координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ :

$$\sum \delta_x \delta_x \rightarrow \min; \sum \delta_y \delta_y \rightarrow \min; \sum \delta_z \delta_z \rightarrow \min.$$

В результате определено и графически построено освобожденное от трендовой составляющей поле векторов геодинамических движений исследуемой территории ВКМ, в котором визуально определяются вихревые сдвижения (рис. 3). Важность визуализации вихревых (ротационных) геодинамических движений объясняется тем, что границы вихрей формируются по границам крупных подвижных структурных нарушений, что позволяет их идентифицировать как активные тектонические структуры района [6, 7].

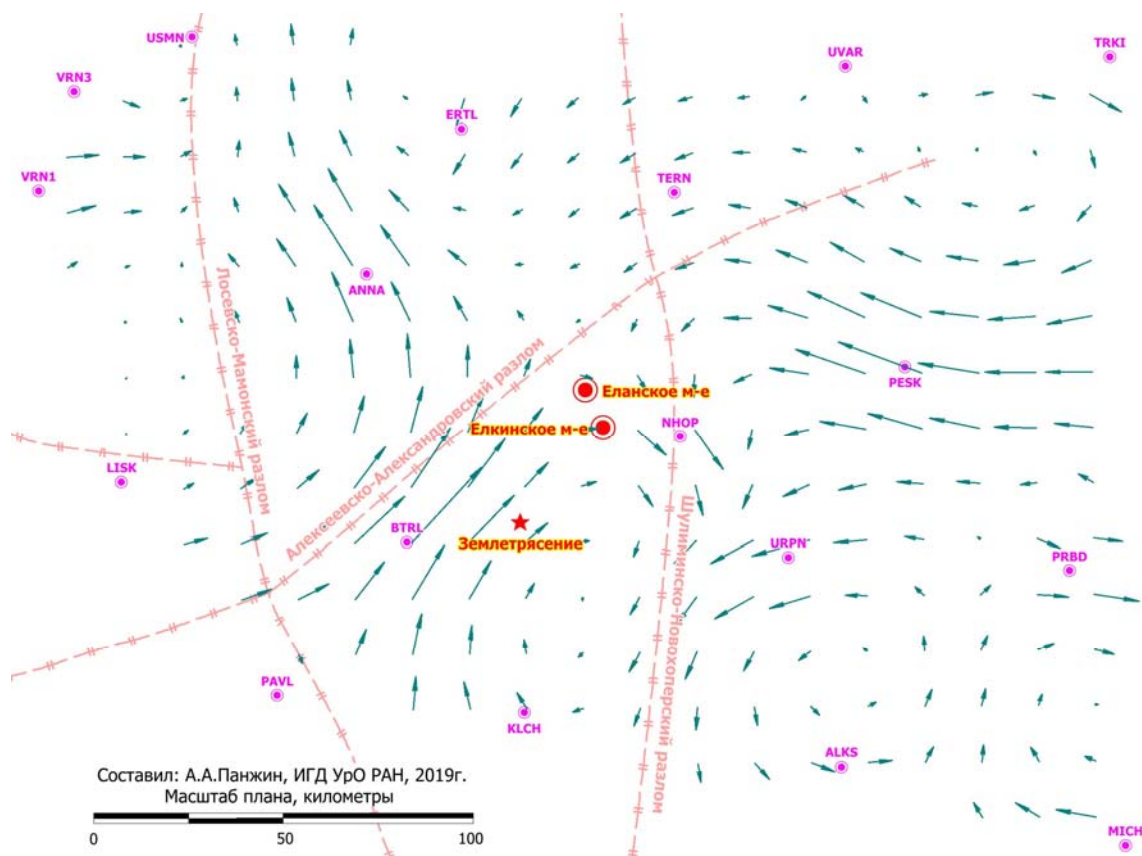


Рис. 3 – Вихревые движения на исследуемой территории

### *Визуализация геодинамических движений*

Полученные в результате измерений геодинамические движения с использованием математического аппарата механики сплошной среды преобразуются также в векторное и тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций (рис. 4). Это позволяет выделить и идентифицировать зоны с максимальными значениями главных деформаций как растяжения, так и сжатия, а также зоны с повышенными значениями сдвиговых деформаций, приводящих к разрушениям объектов инфраструктуры.

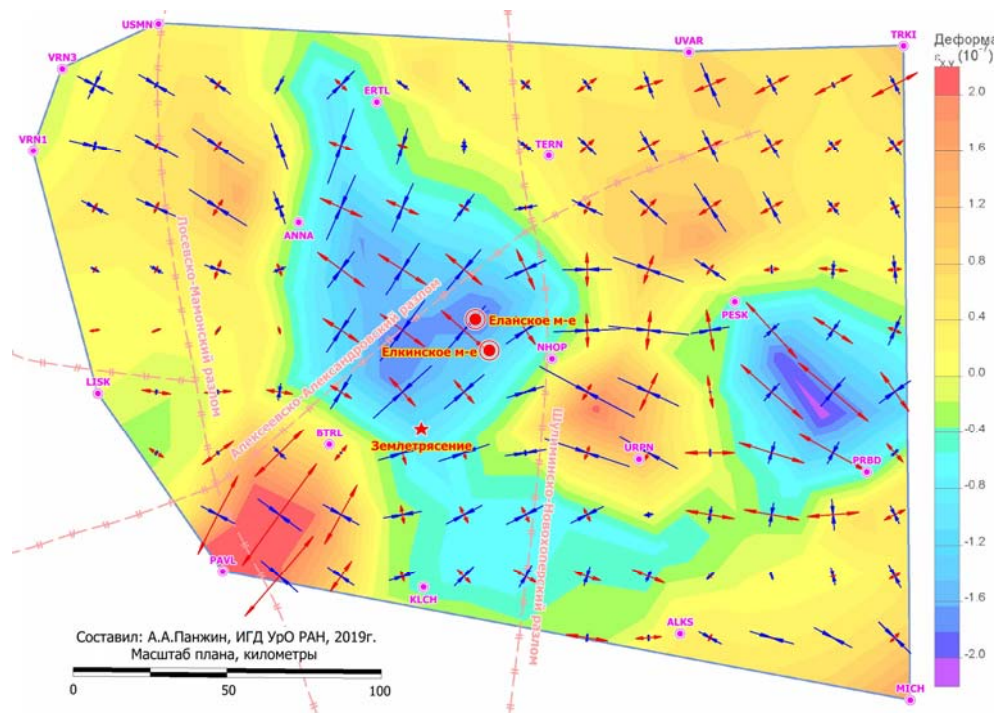


Рис. 4 – Совмещенная схема поля тензоров горизонтальных главных деформаций (стрелки) и уровня сдвиговых деформаций (цвет, шкала справа)

Другой важной характеристикой векторного поля геодинамических движений является дивергенция, которая характеризует степень сходимости или расходимости векторного потока, знание закономерностей распределения ее характеристик позволяет идентифицировать источники формирования и стока деформационных процессов и определить их пространственное положение. Разработан и алгоритмически реализуется математический аппарат [8, 9], позволяющий определять дивергенцию по результатам исходных данных, представленных как в виде равномерной Крайгинг-модели, так и в виде данных, представленных в вершинах единичных элементов триангуляции Делоне.

#### Заключение

Таким образом, в статье обозначены основные положения методики мониторинга и визуализации современных геодинамических движений в виде векторного поля по результатам цикловых геодезических измерений. На основании экспериментальных данных, полученных на ВКМ по результатам деформационного мониторинга по постоянно действующим на территории региона станциям GNSS, установлен вихревой характер современных геодинамических движений как индикатор активных тектонических нарушений. Это позволяет на основании моделирования выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы за счет анализа поля сдвижений и деформаций, что необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и обоснования профилактических мер по обеспечению безопасности населения, промышленных объектов и др. [10].

Другими вопросами визуализации геодинамических движений по результатам мониторинговых измерений, требующими дальнейшей проработки, но не затронутыми на данном этапе, являются:

- Окончательная реализация в виде компьютерной программы разработанного математического аппарата оценки дивергенции векторных полей, что позволит определять дивергенцию по результатам исходных геодезических данных.
- Решение вопроса о возможности повышения оперативности получения результатов геодинамических исследований за счет использования в расчетах точных эфеме-

рид разного класса (Rapid vs Final). В настоящее время проведено две серии эксперимента, показавших противоречивые данные, готовится к проведению третья серия.

- Решение вопроса о выборе минимально возможного интервала между цикловыми сериями инструментальных измерений, при котором погрешности единичных измерений будут оказывать минимальное влияние на результат определения скоростей современных геодинамических движений.

### Список литературы

1. Уткин В.И., Белоусова А.А., Тягунов Д.С., Баландин Д.В., 2010. Исследование геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS. *Доклады Академии наук*, Т. 431, № 2, С. 246-251.
2. Панжин А.А., 2015. Исследование геодинамических движений CORS для обоснования методики контроля процесса сдвижения на месторождениях Уральского региона. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, № 1 (49), С. 22-26.
3. J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins et al., 1997. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, Т. 102, № В3, С. 5005–5017.
4. Мазуров Б.Т., Панжин А.А., Силаева А.А., 2016. Структурное моделирование полученных по геодезическим данным сдвижений путем визуализации. *Геодезия и картография*, № 3, С. 35-40. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3-25-40.
5. Панжин А.А., Панжина Н.А., 2019. Оценка стабильности опорных пунктов как основы для геодинамического мониторинга. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 6., С. 31-40. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-31-40.
6. Мазуров Б.Т., 2019. Математическое моделирование при исследовании геодинамики. Новосибирск: СГУГиТ, 360 с.
7. Викулин А.В., 2016. Ротационные волны в блоковых вращающихся средах (на примере геологической среды). *Процессы в геосредах*, № 7, С. 194-206.
8. Колмогоров В.Г., Мазуров Б.Т., Панжин А.А., 2018. Алгоритм оценки дивергенции векторных полей движений земной поверхности по геодезическим данным. *Геодезия и картография*, Т. 79, № 10, С. 46-53. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-940-10-46-53.
9. Мазуров Б.Т., Мустафин М.Г., Панжин А.А., 2019. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых. *Записки Горного института*, Т. 238, № 4, С. 376-382. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.376.
10. Сашурин А.Д., Панжин А.А., 2020. Современные проблемы и задачи геомеханики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3-1, С. 188–198. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198.

### References

1. Utkin V.I., Belousova A.A., Tyagunov D.S., Balandin D.V., 2010. *Issledovanie geodinamiki Severnogo i Srednego Urala po dannym GPS* [Study of Geodynamics of the Northern and Middle Urals Using GPS Data]. *Doklady Akademii nauk*, Т. 431, № 2, S. 246-251.
2. Panzhin A.A., 2015. *Issledovanie geodinamicheskikh dvizhenii CORS dlya obosnovaniya metodiki kontrolya protsesssa sdvizheniya na mestorozhdeniyakh Ural'skogo regiona* [Study of Geodynamic CORS Movements to Substantiate the Methodology for Process Monitoring of Fields Displacements in the Ural Region]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, № 1 (49), S. 22-26.

3. J. F. Zumberge, M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins et al., 1997. *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks* // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), T. 102, № B3, C. 5005–5017.
4. Mazurov B.T., Panzhin A.A., Silaeva A.A., 2016. *Strukturnoe modelirovanie poluchennykh po geodezicheskim dannym sdvizhenii putem vizualizatsii* [Structural Modeling of Strike Shifts Obtained from Geodetic Data by Visualization]. *Geodeziya i kartografiya*, № 3, S. 35-40. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3-25-40.
5. Panzhin A.A., Panzhina N.A., 2019. *Otsenka stabil'nosti opornykh punktov kak osnovy dlya geodinamicheskogo monitoringa* [Assessment of the Stability of Reference Points as a Basis for Geodynamic Monitoring]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 6., S. 31-40. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-31-40.
6. Mazurov B.T., 2019. *Matematicheskoe modelirovanie pri issledovanii geodinamiki* [Mathematical Modeling in the Study of Geodynamics]. Novosibirsk: SGUGiT, 360 s.
7. Vikulin A.V., 2016. *Rotatsionnye volny v blokovykh vrashchayushchikhsya sredakh (na primere geologicheskoi sredy)* [Rotational Waves in Block Rotating Structure (on Example of Geological Structure)]. *Protssesy v geosredakh*, № 7, S. 194-206.
8. Kolmogorov V.G., Mazurov B.T., Panzhin A.A., 2018. *Algoritm otsenki divergentsii vektornykh polei dvizhenii zemnoi poverkhnosti po geodezicheskim dannym* [Algorithm for Estimating the Divergence of Vector Fields of Earth Surface Movements Based on Geodetic Data]. *Geodeziya i kartografiya*, T. 79, № 10, S. 46-53. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-940-10-46-53.
9. Mazurov B.T., Mustafin M.G., Panzhin A.A., 2019. *Metod otsenki divergentsii vektornykh polei deformatsii zemnoi poverkhnosti pri razrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* [Method for Estimating the Divergence of Vector Fields of Earth Surface Deformations during Development of Mineral Deposits]. *Zapiski Gornogo instituta*, T. 238, № 4, S. 376-382. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.376.
10. Sashurin A.D., Panzhin A.A., 2020. *Sovremennye problemy i zadachi geomekhaniki* [Modern Issues and Objectives of Geomechanics]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3-1, S. 188–198. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198.