



**ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД
В ПРИРАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ КАРЬЕРА АЛМАЗОНОСНОЙ ТРУБКИ “ЗАРНИЦА”**

В. И. Востриков¹, А. А. Потака², К. Л. Наумов²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vvi.49@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

²*Управление Удачинского ГОКа, E-mail: potakaaa@alrosa.ru,
г. Удачный 678188, Саха*

На карьере алмазоносной трубки “Зарница” в период 2019–2020 гг. функционировала многоканальная измерительно-вычислительная система в составе четырех датчиков. В 2019 г. на карьере велись интенсивные горные работы. Датчики регистрировали динамические изменения размеров ширины приразломных зон. После консервации работ на карьере в 2020 г. размеры ширины приразломных зон начали плавно изменяться с положительными и отрицательным трендами, что свидетельствовало об увеличении напряженного состояния массивов горных пород. Причем эти изменения превышали значения, когда на карьере проводились горные работы. Установлено, что динамические воздействия уменьшают напряженное состояние массивов горных пород.

Алмазоносный карьер, измерительно-вычислительная система, датчик, мониторинг, тектонический разлом, приразломная зона, смещение

**GEODYNAMIC STATE OF ROCK MASSES
IN THE FAULT ZONES OF ZARNITSA DIAMOND PIPE**

V. I. Vostrikov¹, A. A. Potaka², and K. L. Naumov²

¹*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: vvi.49@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

²*Management of Udachny Mining and Processing Division,
E-mail: potakaaa@alrosa.ru, Udachny, Mirny District, 678188, Sakha Republic*

A multi-channel measuring and computing system consisting of four sensors was in operation at the open pit of Zarnitsa diamond pipe in 2019 and 2020. In 2019, intensive mining operations were carried out at the open pit. The sensors recorded dynamic changes in the width dimensions of fault zones. After temporary closing down of mining operations in the beginning of 2020, the widths of fault zones changed smoothly with positive and negative trends, which indicated an increase in the stress state of rock masses. These changes exceeded the values when mining operations were conducted. It is found that dynamic effects reduce the stress state of rock masses.

Diamond mine, measuring and computing system, sensor, monitoring, tectonic fault, fault zone, displacement

Массивы горных пород карьеров всегда находятся под действием напряжений, приводящих к разрушению скальных пород и образованию системы трещин и расщелин, которые делят массив на разномасштабные по размерам геоблоки [1]. Кроме того, тектонические разломы, к которым чаще всего приурочены месторождения твердых полезных ископаемых, в частности

алмазосодержащие, “разрывают” карьеры на крупные конгломераты, на границах которых формируются зоны динамического влияния разломов, характеризующиеся повышенной плотностью трещин [2, 3]. Под действием этих факторов массив приобретает вид иерархически построенной структуры.

Увеличение добычи полезных ископаемых ведет к интенсификация горных работ, в результате которых блочная структура обновляется. В этих условиях особая роль отводится надежному обоснованию, обеспечению и постоянному инструментальному контролю за геомеханическими процессами в массивах горных пород в период строительства и эксплуатации карьеров [4, 5]. Любое нарушение устойчивости бортовых откосов, уступов между транспортными съездами, бортов карьера необходимо фиксировать, так как оно влияет на технологические процессы в целом, экономическую эффективность предприятия и безопасность труда [6], т. е. должна быть создана система контроля за геомеханическим состоянием откосов, уступов и бортов.

За рубежом разрабатываются и эксплуатируются измерительные комплексы, основанные на различных методах контроля: радиолокации, фотограмметрии, деформационный с использованием оптоволоконных датчиков и датчиков смещения, GPS навигации, сейсмические и др. [7 – 15]. В России построением измерительных комплексов для регистрации геомеханического состояния массивов горных пород на глубоких карьерах занимаются несколько институтов: Институт земной коры г. Иркутск, Институт физики прочности и материаловедения г. Томск, Горный институт Кольского научного центра [16 – 18].

В Институте горного дела СО РАН создан и проходит проверку на работоспособность в режиме долговременного мониторинга на алмазоносном карьере “Зарница” измерительно-вычислительный комплекс под названием “Разлом” [19, 20]. В данной работе приводятся результаты мониторинга геомеханического состояния массивов горных пород карьера “Зарница” в 2019 – 2020 гг.

По сравнению с комплексом, описанным в работе [19], в систему добавлены датчики, таким образом, в рассматриваемый период времени функционировало четыре датчика. Кроме того, изменены места их размещения. Необходимо отметить, что датчики устанавливались вдоль берм, так как приразломные зоны ориентированы квазиперпендикулярно борту карьера. Измерительная база датчиков составляла от 1.9 до 13 м. На таких расстояниях охватывается участок горных пород, который может содержать от одной и более трещин шириной от 1 см до нескольких десятков метров, расположенных одна от другой на расстояниях от 0.5 м и больше.

Широкий диапазон нарушений сплошности определяет конструктивные особенности систем контроля. Для регистрации изменения размера ширины трещин используются датчики, непосредственно располагаемые в трещинах [21, 22], а для регистрации геомеханического состояния приразломных зон — датчики с большой измерительной базой, выполненные на прецизионных многооборотных потенциометрах с тросиковыми приводами [23, 24] и обладающие следующими основными характеристиками: измерительный диапазон ± 15 см, точность 0.1 мм, температурный диапазон работы $-40 \div +70^\circ\text{C}$.

Мониторинг геомеханического состояния на карьере алмазоносной трубки “Зарница”
На карьере “Зарница” в 2019 г. велись интенсивные горные работы. С начала 2020 г. карьер консервировали, горные работы прекратились. В марте было отключено общее электроснабжение карьера, а так как электропитание блока связи системы с Интернет осуществлялось от общей сети, то передача измерительной информации прервалась.

Предстояло исследовать геомеханическое состояние массивов горных пород в период интенсивного ведения горных работ и после их прекращения. Чрезвычайно интересно было сравнить поведение этого состояния на участках приразломных зон.

На рис. 1–4 представлены результаты мониторинга по датчикам за периоды октябрь – декабрь 2019 г. и январь – март 2020 г.

Датчик 1 (Д1). Датчик установлен на гор. +400 м северного борта в районе приразломной зоны северного направления разлома. Измерительная база составляет 10 м. Из рис. 1а, следует, что в период 1.10.2019 г. – 22.10.2019 гг. произошло увеличение ширины приразломной зоны на 3 мм с последующим сужением на 2 мм. Наблюдается “изрезанность” графика как следствие взрывных работ. На конечном этапе мониторинга ширина приразломной зоны увеличилась примерно на 1 мм, после прекращения горных работ в январе 2020 г. она не изменялась (рис. 1б), а затем начала плавно расти и в марте составила 13 мм.

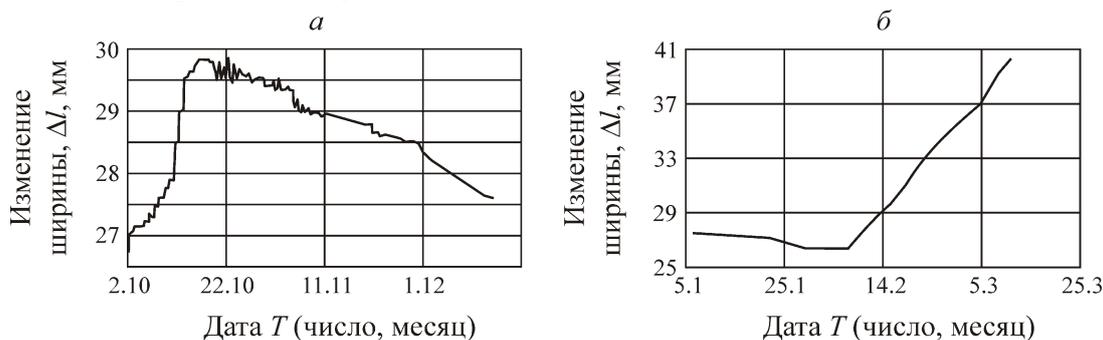


Рис. 1. Результаты мониторинга по Д1: а — период октябрь–декабрь 2019 г.; б — январь–март 2020 г.

Датчик 2 (Д2). Датчик размещен на гор. +380 м под датчиком Д1, расположенном выше, на том же разломе. Измерительная база составляет 13 м. На рис. 2а показана зависимость геомеханического состояния этого участка массива горных пород от взрывных работ. Максимальное увеличение ширины приразломной зоны достигает 10 мм. Отмечается более значительная динамика поведения приразломной зоны по сравнению с вышележащим гор. +400 м, где установлен Д1. После прекращения взрывных воздействий в 2020 г. произошло плавное увеличение ширины приразломной зоны, которое за январь составило 18 мм (рис. 2б). На этих и последующих графиках нанесена полиномиальная аппроксимирующая кривая.

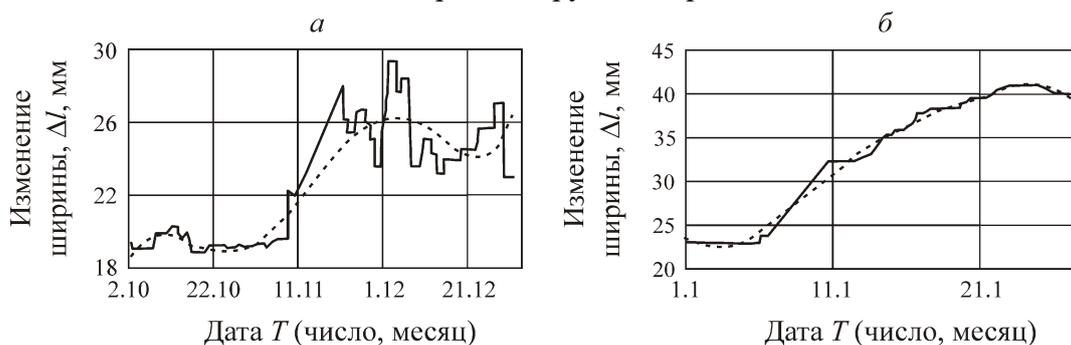


Рис. 2. Результаты мониторинга по Д2: а — период октябрь–декабрь 2019 г.; б — январь–март 2020 г.

Датчик 3 (Д3). Измерительная база датчика равна 1.9 м. Датчик находился на квазиперпендикулярном разломе направления “юго-запад” на западном борту карьера на гор. +380 м. Результаты мониторинга представлены на рис. 3.

Данный участок массива в период ведения горных работ так же, как и участки, контролируемые датчиками Д1, Д2, реагировал на взрывные работы. При этом максимальное изменение ширины зоны составило 4 мм (рис. 3а). В 2020 г. на этом участке регистрировался плавный рост ширины приразломной зоны с некоторым “выбросом” в первой декаде февраля величиной 4 мм (рис. 3б). Максимальное изменение за период мониторинга составило 14 мм.

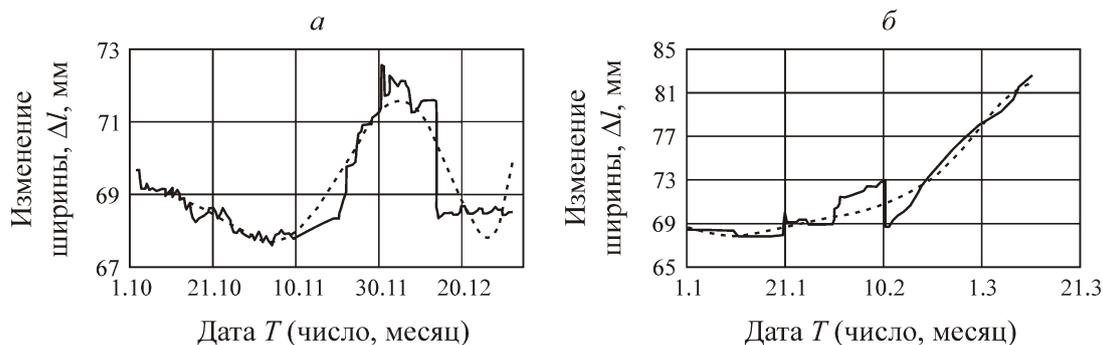


Рис. 3. Результаты мониторинга по ДЗ: а — период октябрь–декабрь 2019 г.; б — январь–март 2020 г.

Датчик 4 (Д4). Измерительная база датчика составляет 11 м. Датчик установлен на юго-восточном борту карьера на гор. +380 м, им контролировалось южное крыло разлома северного направления. Результаты мониторинга показаны на рис. 4.

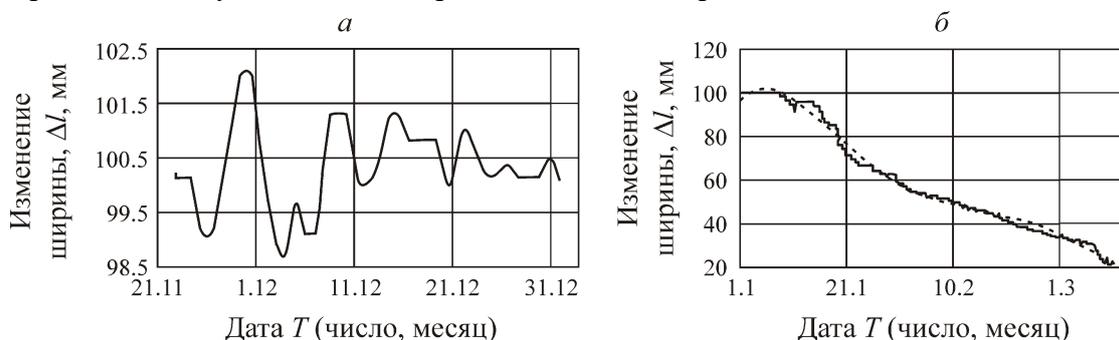


Рис. 4. Результаты мониторинга по Д4: а — период ноябрь–декабрь 2019 г.; б — январь–март 2020 г.

Наблюдаемый участок приразломной зоны имел волнообразный характер изменения геодинамического состояния в 2019 г. Взрывные работы в это время велись под контролируемым участком массива горных пород. Максимальное изменение составляло 4 мм. В январе–марте 2020 г. зарегистрировано плавное существенное уменьшение ширины приразломной зоны на 80 мм.

Анализируя полученные измерительные данные можно предположить, что динамические воздействия служили “спусковыми крючками” для напряженно-деформированного состояния массивов горных работ. Здесь можно провести аналогию с изобретением [25], где малыми динамическими воздействиями осуществлялось управление смещениями геоблоков в сейсмоактивных разломах, хотя масштабы несоизмеримы.

ВЫВОДЫ

В 2019 г. на карьере алмазоносной трубки “Зарница”, когда осуществлялись интенсивные горные работы, была развернута и включена в режим долговременного мониторинга измерительно-вычислительная система в составе четырех датчиков. Каждую неделю проводились взрывные воздействия с массой по ВВ 50–100 т. С начала 2020 г. горные работы прекратились, было отключено общее энергопитание, ликвидирован узел приема/передачи информации, питание которого осуществлялось от общей сети. Соответственно, перестала поступать информация в службу деформационного контроля Удачинского горно-обогатительного комбината и Интернет. В период выполнения взрывных работ в 2019 г. все датчики показывали существенные динамические изменения ширины приразломной зоны, которые составляли 3–10 мм. После прекращения взрывных работ “поведение” приразломных зон резко изменилось. На датчиках Д1–Д3, установленных на северном и западном бортах карьера, регистрировались плавные изменения с положительным трендом +13 ÷ +18 мм, на датчике Д4 — с отрицательным трендом –80 мм.

Максимальные изменения по датчикам в период консервации карьера превышали их значения в период ведения взрывных работ, особенно на участке юго-восточного борта, контролируемого датчиком Д4. Без динамических воздействий повышение напряженно-деформированного состояния приводит к существенным плавным изменениям значений ширины приразломных зон. Таким образом взрывные работы “сбрасывали” накапливающееся напряжение массивов горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Kocheryan G. G.** Fault geomechanics, Moscow, 2016, 424 pp. [**Кочерян Г. Г.** Геомеханика разломов. — М., 2016. — 424 с.]
2. **Sherman S. I., Bornyakov S. A., and Buddo V. Yu.** Areas of dynamic influence of faults (simulation results), Novosibirsk, Nauka, 1983, 110 pp. [**Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю.** Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). — Новосибирск: Наука, 1983. — 110 с.]
3. **Seminsky K. Zh.** Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect, Novosibirsk, Branch “Geo”, 2003, 243 pp. [**Семицкий К. Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. — Новосибирск: филиал “Гео”, 2003. — 243 с.]
4. **Monitoring** of the condition of slopes of benches and sides of open pits, Monograph, F. K. Nizametdinov, S. G. Ozhigin, S. B. Ozhigina, V. N. Dolgonosov, K. Radey, and G. Stankova, Zdiba, 2015, 350 pp. [**Мониторинг** состояния откосов уступов и бортов карьеров. Монография / Ф. К. Низаметдинов, С. Г. Ожигин, С. Б. Ожигина, В. Н. Долгоносков, К. Радей, Г. Станькова. — Здибы, 2015. — 350 с.]
5. **Varyakh A. A.** South African technical safari, Mountain echo, 2006, vol. 2, no. 24, pp. 49–53. [**Барях А. А.** Южноафриканское техническое сафари // Горное эхо. — 2006. — Т. 2. — № 24. — С. 49–53.]
6. **Spirin V. I., Livinsky I. S., and Khormazabal E.** Optimization of pit wall designs based on risk assessment, Bulletin of the Tula State University, Earth sciences, 2019, issue 3, pp. 317–330. [**Спирин В. И., Ливинский И. С., Хормазабаль Э.** Оптимизация конструкций бортов карьеров на основе оценки рисков // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2019. — Вып. 3. — С. 317–330.]
7. **Bao X. and Chen L.** Recent progress in distributed fiber optic sensors, Sensors, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 31–39.
8. **Brückl E., Brunner F. K., and Kraus K.** Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data, Engineering Geology, 2006, vol. 88, no. 3, pp. 149–159.
9. **Brückl E., Brunner F. K., Lang E., Mertl S., Müller M., and Stary U.** The Gradenbach Observatory – monitoring deep-seated gravitational slope deformation by geodetic, hydrological, and seismological methods, Journal of the International Consortium on Landslides, 2013, vol. 10, no. 6, pp. 815–829.
10. **Lai X., Shan P., Cai M., Ren F., and Tan W.** Comprehensive evaluation of high-steep slope stability and optimal high-steep slope design by 3D physical modeling, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2015, vol. 22, no. 1, pp. 1–10.
11. **Towhata I., Uchimura T., Seko I., and Wang L.** Monitoring of unstable slopes by MEMS tilting sensors and its application to early warning. International Symposium on Geohazards and Geomechanics, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2015, vol. 26, 012049.
12. **Atzeni C., Barla M., Pieraccini M., and Antolini F.** Early Warning monitoring of natural and engineered slopes with ground-based synthetic-aperture radar, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014.
13. **Kumar A. and Rathee R.** Monitoring and evaluating of slope stability for setting out of critical limit at slope stability radar, International Journal of Geo-Engineering, September 2017.
14. **Little M. J.** Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation. International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, 2015, pp. 211–230.
15. **Tao Z., Li H., Zhang H., and Zhang X.** Real-time remote monitoring system based on the large deformation cable with constant resistance for landslide Disaster and its application, The Open Civil Engineering Journal, 2015, vol. 9, pp. 504–509.

16. **Zarovnyaev B. N., Shubin G. V., and Vasiliev I. V.** The use of laser scanning to study the geomechanical state of the pit walls, *International Research Journal. Technical science*, October 2012, pp. 76–77. [Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Васильев И. В. Использование лазерного сканирования для исследования геомеханического состояния бортов карьеров // *Международ. науч.-иссл. журнал. Технические науки*. — Октябрь 2012. — С. 76–77.]
17. **Cherkashin S. G., Drozdov A. V., and Melnikov A. I.** Assessment of the condition of the walls of the Nyurbinsky open-pit mine based on the results of hydrogeomechanical monitoring. *International Journal of Applied and Basic Research*, 2015, no. 5 (part 2). S. 276–281. [Черкашин С. Г., Дроздов А. В., Мельников А. И. Оценка состояния бортов карьера “Нюрбинский” по результатам гидрогеомеханического мониторинга. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. № 5 (часть 2). С. 276–281.]
18. **Bornyakov S. A. and Salko D. V.** Instrumental deformation monitoring system and its trial in open-pit diamond mine, *Journal of Mining Science*, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 172–178. [Борняков С. А., Салко Д. В. Инструментальная система деформационного мониторинга и ее апробация в кимберлитовом карьере // *ФТПРПИ*. — 2016. — № 2. — С. 172–178.]
19. **Vostrikov V. I., Polotnyanko N. S., Trofimov A. S., and Potaka A. A.** Monitoring of the geomechanical state of rock massifs at the quarry of the diamond-bearing tube “Zarnitsa”, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 35–39. [Востриков В. И., Полотнянко Н. С., Трофимов А. С., Потака А. А. Мониторинг геомеханического состояния массивов горных пород на карьере алмазодобывающей трубки “Зарница” // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 35–39.]
20. **Vostrikov V. I. and Gavrilov S. Yu.** Geomechanical state of rock masses at the quarry of the Zarnitsa diamond pipe, *Fundamental and Applied Mining Sciences*, 2020 vol. 7, no. 1, pp. 267–271. [Востриков В. И., Гаврилов С. Ю. Геомеханическое состояние массивов горных пород на карьере алмазодобывающей трубки “Зарница” // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 267–271]
21. **Vostrikov V. I., Ruzhich V. V., and Federyaev O. V.** Monitoring rock fall-hazardous sites in open pit walls, *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 6, pp. 118–127. [Востриков В. И., Ружич В. В., Федеряев О. В. Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // *ФТПРПИ*. — 2009. — № 6. — С. 118–127.]
22. **Vostrikov V. I., and Oparin V. N.** Multichannel Instrumentation System for Strain and Displacement Measurements, *Proceeding of the International Symposium on Mechatronic and Biomedical Engineering and Applications*, Taiwan, November 5, 2009, С. 13–17.
23. **Vostrikov V. I. and Potaka A. A.** Multichannel facility for bidimensional measurement of rock block displacements in deep open pit mines, *Journal of Mining Science*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 189–194. [Востриков В. И., Потака А. А. Многоканальный комплекс для двухкоординатных измерений смещений блоков горных пород на глубоких карьерах. // *ФТПРПИ*. — 2021. — № 1. — С. 189–194.]
24. **Vostrikov V. I. and Polotnyanko N. S.** Karier multichannel measurement system for deep open pit walls monitoring, *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 224–229 [Востриков В. И., Полотнянко Н. С. Многоканальная измерительная система “Карьер” для мониторинга бортов глубоких карьеров // *ФТПРПИ*. — 2014. — № 6. — С. 224–229.]
25. **Pat. 2273035 RF.** A method for controlling the displacement regime in fragments of seismically active tectonic faults, V. V. Ruzhich, S. G. Psakhye, V. L. Popov, E. V. Shilko, S. V. Astafurov, O. P. Smekalin, S. A. Vornyakov, *Vyull. Izobret.*, 2006, no. 14. [Пат. 2273035 РФ. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов / В. В. Ружич, С. Г. Псахье, В. Л. Попов, Е. В. Шилко, С. В. Астафуров, О. П. Смекалин, С. А. Борняков // *Опубл. в БИ*. — 2006. — № 14.]