

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГОВ БОРТОВ НА ПРИМЕРЕ 3D РАДАРА GROUND PROBE SSR-XT**

*Виталий Андреевич Шаворин*

АО «Полюс-Красноярск», 630108, Россия, г. Красноярск, ул. Цимлянская, 37, горный инженер отдела геотехнического мониторинга, тел. (913)376-76-46, e-mail: shavorinva@yandex.ru

*Александр Сергеевич Горилько*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)750-78-06, e-mail: cahek28@mail.ru

В статье рассмотрена современная технология интерферометрических измерений для целей геотехнического мониторинга бортов карьеров, основанная на применении 3D радара GroundProbe SSR-XT. Выполнены экспериментальные исследования точности данного оборудования. По результатам исследований установлена фактическая точность интерферометрического метода измерений. Описана оптимальность применения данного метода исследований бортов карьеров. При интерферометрическом методе измерений при геотехническом мониторинге бортов разрабатываемых карьеров, отсутствует необходимость установки деформационных марок, что упрощает процесс работ. При традиционных методах необходима установка таких марок, что повышает риски для безопасности исполнителей работ по геотехническому мониторингу.

**Ключевые слова:** карьер, геотехнический мониторинг, 3D радар, интерферометрический метод, уголкового отражатель точность измерений.

## **STUDY OF MEASUREMENT SYSTEM ACCURACY OF OPEN PIT SIDES DISPLACEMENT ON THE EXAMPLE OF 3DRADARGROUNDPROBESSR-XT**

*Vitalij A. Shavorin*

JSC “Polus- Krasnojarsk”, 37, Cimljanskajast-t, Krasnojarsk, 630108, Russia, Mine Engineer of Geotechnical Monitoring Department, phone: (913)376-76-46, e-mail: shavorinva@yandex.ru

*Aleksandr S. Goril'ko*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (913)750-78-06, e-mail: cahek28@mail.ru

The article considers the modern technology of interferometric measurements for the purposes of open pit sides geotechnical monitoring, based on the use of 3D radar Ground Probe SSR-XT. Experimental research of measurement accuracy of the given equipment was performed. The results of the mentioned research state the actual accuracy of interferometric measurement method. The optimal application of this method for studying the sides of quarries is described. With the interferometric measurement method for geotechnical monitoring of the sides of quarries under development, there is no need to install deformation marks, which simplifies the work process. With traditional methods, it is necessary to install such marks, which increases security risks for the performers of geotechnical monitoring.

**Key words:** open pit, geotechnical monitoring, 3D radar, interferometric method, angle reflector, measurement accuracy.

## *Введение*

В настоящее время определение пространственного положения бортов карьеров для целей геотехнического мониторинга является одной из самых важных производственных задач при добыче полезных ископаемых.

Одним из новейших направлений мониторинга устойчивости бортов карьеров, является интерферометрическое исследование посредством систем измерения сдвигов бортов (радаров) [1–3].

Существующие методы геотехнического мониторинга такие как: линейно-угловые измерения высокоточными автоматизированными тахеометрами, лазерное сканирование и другие наиболее трудоемки при обработке результатов наблюдений [4–9].

Целью работы является определение фактической точности интерферометрического метода геодезических измерений посредством экспериментальных исследований возможностей 3D радара GroundProbe SSR-XT.

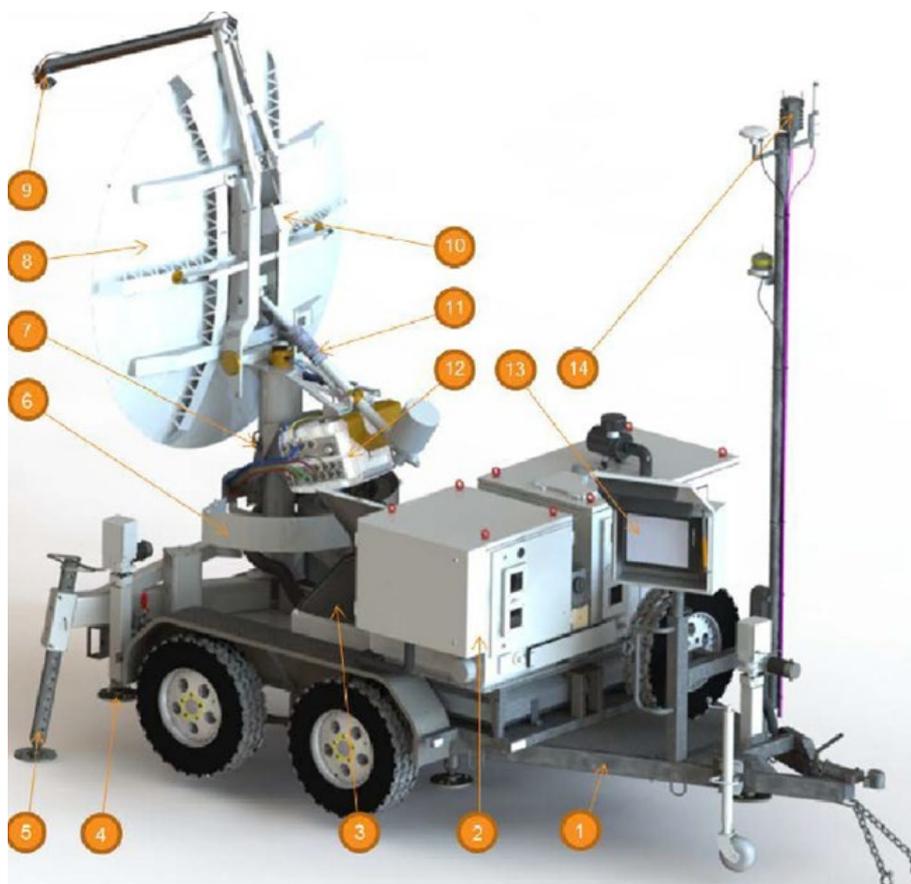
В этом случае предлагается произвести цикл интерферометрических исследований 3D радаром для выполнения объективной оценки точности измерений.

## *Методы и материалы*

Система отслеживания деформационных процессов интерферометрического радара GroundProbe SSR-XT представляет геотехнический комплекс, посредством которого представляется возможным наблюдать за полной картиной сдвигов откосов карьеров. Локатор радара генерирует непрерывный поток измеренных величин, которые можно анализировать и сравнивать с имеющимися данными, что позволяет свести к минимуму неожиданные деформационные процессы [1].

Технологическая система радара GroundProbe SSR-XT представлена на рисунке 1. Прицеп служит непосредственно для транспортировки радара, дизель-генератор и аккумуляторная батарея – для обеспечения бесперебойного питания. Ящик для инструментов служит также для расположения уклономера и органов управления электрических домкратов, предназначенных для установки антенны в горизонтальное положение, при развертывании системы. Опоры треноги обеспечивают устойчивую горизонтальную установку антенны. В системе радара имеется внешний циркулятор – устройство, позволяющее принимать радиочастоты при помощи одной антенны. Параболическая антенна представлена в виде рефлектора диаметром 1,8 м, который фокусирует радиочастотную энергию в узкий луч. Рупорный излучатель передает сигнал радара на рефлектор антенны, получает отраженный радарный сигнал с рефлектора антенны и передает в компьютер для последующей обработки. Система съемки изображений (VCS)

включает камеру, делающую фотоснимки сканирующей зоны, привод подъема отвечает за перемещение антенны по оси наклона (вверх и вниз). Электронный модуль радара (REM) состоит из компьютера SSR, радарного электронного оборудования, коммуникационных блоков, контроллеров моторов. В интерфейс пользователя входит сенсорный компьютерный дисплей и виртуальная клавиатура. Погодная станция передает метеоданные в электронный модуль (REM), обеспечивает введение поправок за атмосферу и переводит антенный блок в парковочное положение при сильном ветре [1].



1 – прицеп, 2 – блок источника питания, 3 – ящик для инструментов, 4 – электрические домкраты, 5 – опорные треноги, 6 – направляющий канал энергетической цепи, 7 – внешний циркулятор, 8 – параболическая антенна, 9 – рупорный излучатель, 10 – система съемки изображений (VCS), 11 – привод подъема, 12 – электронный модуль радара (REM), 13 – интерфейс пользователя, 14 – метеостанция (WS)

Рис. 1. Технологическая система радара GroundProbe SSR-XT

Вышеописанное технологическое устройство радара GroundProbe SSR-XT способно производить геотехнический мониторинг объектов, расположенных от 30 до 3500 м, с точностью измерения движения до 0,1 мм. На удалении 1000 м пиксель представляет собой квадрат размером 8,7 x 8,7 м, как показано на рис. 2 [1, 2].

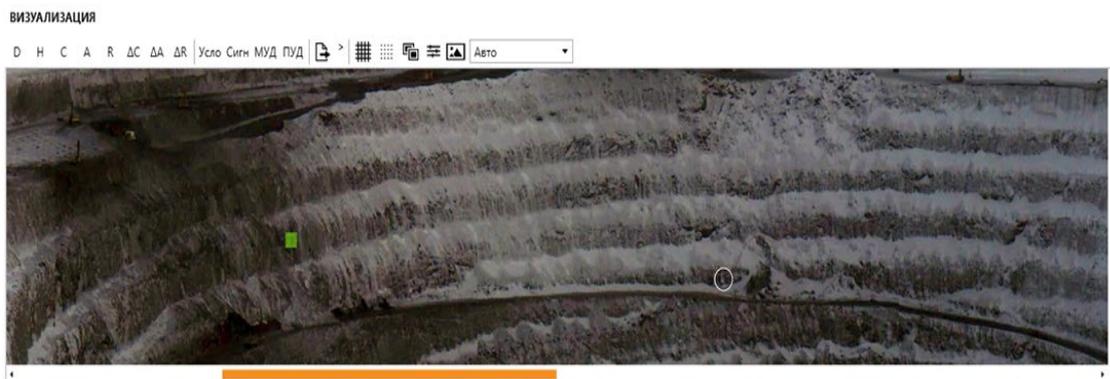


Рис. 2. Выделенный пиксель на карте визуализации в ПО SSR Viewer

Время полного сканирования области размером  $180^\circ \times 60^\circ$  составляет 26 минут и включает в себя сбор данных, их обработку, передачу и выдачу пользователю оповещений. Полученные данные обрабатываются и анализируются с помощью ПО SSR Viewer, осуществляющего визуализацию данных локатора. Интерфейс ПО SSR Viewer представлен на рис. 3.

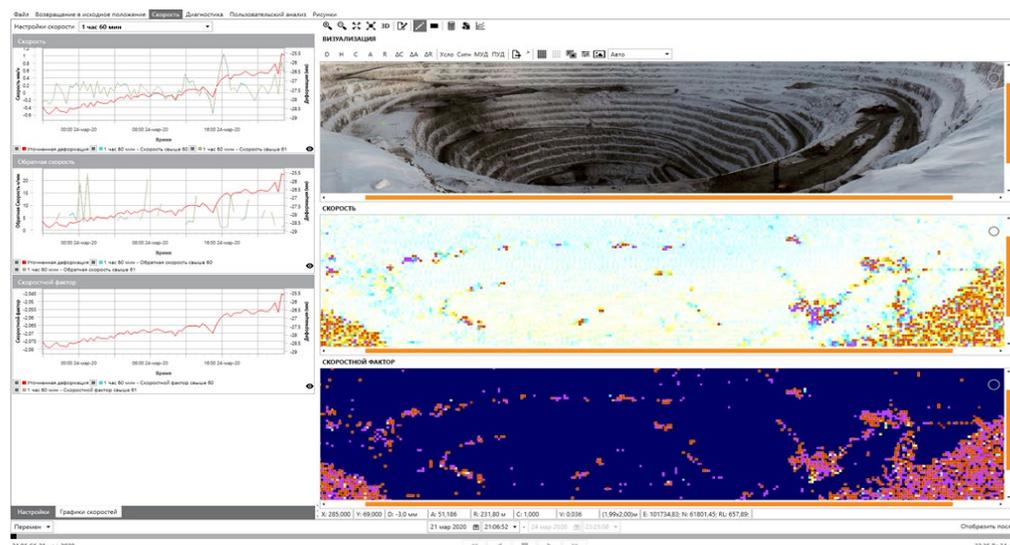


Рис. 3. Интерфейс ПО SSR Viewer.  
Окно анализа скоростных изменений бортов карьера

Основными функциями ПО SSR Viewer являются:

- передача данных локатора;
- оценка и анализ полученных с радара данных;
- оповещение пользователя о превышении заданных допустимых значений;
- настройка границ сканируемого участка;
- прочие функции радара и интегрируемых модулей.

## *Исследование точности системы измерения сдвигов бортов GroundProbe SSR-XT*

Для определения точности сканирования подвижного объекта подобрана следующая методика: на ровной площадке был установлен радар (рис. 4), в 1 км от него установили уголкового отражателя (рис. 5).



Рис. 4. Радар Ground Probe SSR-XT тахеометром Leica TS02 Plus



Рис. 5. Уголкового отражателя с механизмом микрометра

Радаром производилось сканирование зоны, в которую попадал уголкового отражателя. С помощью тахеометра Leica TS02 Plus измерялось расстояние до уголкового отражателя, которое впоследствии использовалось для поиска зоны «активного» пикселя. Затем, посредством перемещения отражателя на некоторую величину механизмом микрометра, область сканировалась снова. Таким образом, в зоне, где радаром было замечено движение, находился уголкового отражателя. Далее микрометром уголкового отражателя смещался на 7,5 мм, 2 мм и 0,5 мм. Всего было выполнено 3 цикла по 4 измерения.

## Результаты

По результатам сканирования, на графике скоростей ПО SSR Viewer наблюдались значения сдвижения отражателя. Пример графика представлен на рис. 5, а в таблице приведены значения и вычисленная погрешность измеренных величин.

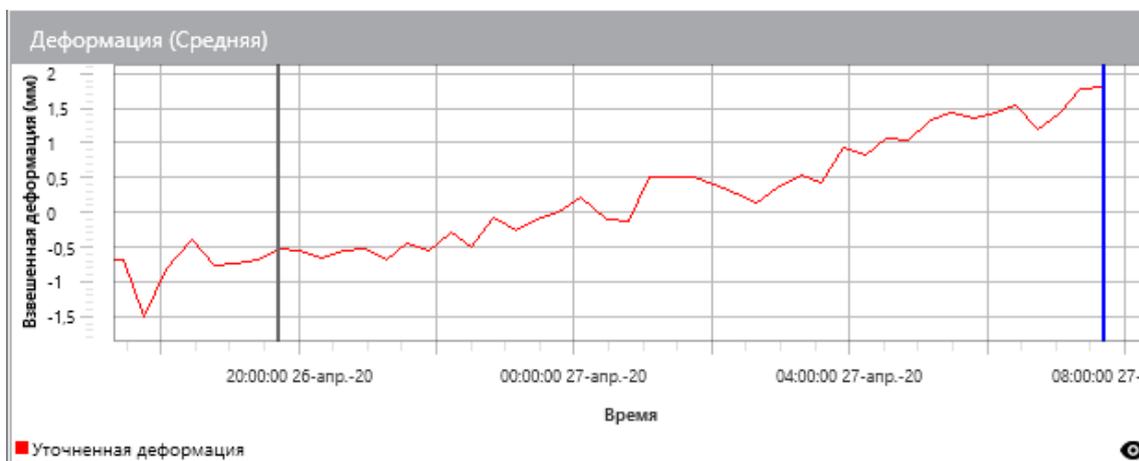


Рис. 5. График движения выделенного пикселя в ПО SSR Viewer

Результаты сканирования радаром SSR-XT подвижного уголкового отражателя

| Смещение отражателя по микрометру (мм) | Значения в ПО SSR Viewer | Смещение отражателя по результатам сканирования SSR-XT (мм) | $\Delta$ (мм) |
|--|--------------------------|---|---------------|
| 0                                      | -0,676                   | 0   |               |
| +7,5                                   | +6,452                   | +7,128  | -0,372        |
| -7,5                                   | -0,868                   | -7,320  | -0,180        |
| +7,5                                   | +6,685                   | +7,553  | +0,053        |
| -7,5                                   | -0,629                   | -7,314  | -0,186        |
| +2                                     | +1,773                   | +2,402  | +0,402        |
| -2                                     | -0,118                   | -1,891  | -0,109        |
| +2                                     | +2,103                   | +2,221  | +0,221        |
| -2                                     | +0,143                   | -1,960  | -0,040        |
| +0,5                                   | +0,757                   | +0,614  | +0,114        |
| -0,5                                   | +0,354                   | -0,403  | -0,097        |
| +0,5                                   | +1,083                   | +0,729  | +0,229        |
| -0,5                                   | +0,603                   | -0,480  | -0,103        |
|  |                          | Средняя накопительная погрешность (СНП)                     | 2,780         |

Опытным путем, была установлена средняя накопительная погрешность измерений движения уголкового отражателя на расстоянии 1 км, она составила 2,780 мм. Формула для расчета усредненной точности (УТ) измерения радарным комплексом представлена в следующем виде:

$$СНП/N=УТ, \quad (1)$$

где  $СНП$  – это средняя накопительная погрешность, полученная в результате измерений.  $N$  – количество измерений.

Подставив численные значения в эту формулу, получим:

$$2,780/12=0,231$$

Итого усредненная точность сканирования радарного комплекса GroundProbe SSR-XT составила 0,231 мм.

Интерферометрический метод измерений для контроля деформационных процессов бортов карьеров является принципиальным современным методом, с некоторыми отличительными особенностями в организации плана работ по геотехническому мониторингу.

При таких методах, как описано в источниках [9–15], присутствует необходимость установки деформационных марок, что может повысить вероятность несчастных случаев при производстве мониторинга.

### *Заключение*

В результате выполненных экспериментальных исследований сделан вывод, что данным технологическим оборудованием на основе интерферометрического метода съемки представляется возможным отслеживать деформационные процессы с точностью до 0,231 мм. Выполнение геотехнического мониторинга посредством интерферометрического радара является наиболее безопасно для исполнителей, так как нет необходимости точно устанавливать деформационные марки. При применении роботизированных тахеометров необходима установка многочисленных призмных отражателей, что является весьма трудоемким, а иногда технически невозможным и даже опасным процессом. Нередко области бортов карьеров непроходимы и имеют угрозу обрушения, следовательно выполнить установку деформационных марок невозможно. В таком случае высокоточное интерферометрическое измерение деформационных процессов антропогенных геологических строений является актуальной на сегодняшний день технологией.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по работе с программным обеспечением радара SSRViewer / Компания «GroundProbe».
2. Ефимов В.И., Попов С.М., Калачёва Л.В. Основные задачи подготовки кадров угольной промышленности с учетом инновационного развития отрасли и предложения по их решению // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. Вып.
3. Ефимов В.И., Попов С.М., Федяев П.М. Методические основы организации подготовки кадров с учетом перспектив инновационного развития угольной отрасли // Сб. науч. тр. междунар. науч.-практич. конф. «Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве». 2015. С. 122-124.
4. Бахаева, С. П. Расчет устойчивости бортов карьеров на ПЭВМ / С. П. Бахаева, А. А. Фадеев, А. В. Гаденов, Т. В. Михайлова ; Учеб. Пособие / Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 1998. – 116 с.

5. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых разрезов. – Л. : ВНИМИ, 1972. – 185 с.
6. Ожигин С. Г. Деформации верхних уступов на Шубаркольском разрезе и разработка мероприятий по их предупреждению//Горный журнал Казахстана. – Алматы, 2009 – №7. – С. 8–9.
7. Долгоносов В.Н., Шпаков П.С., Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Старостина О.В. Аналитические способы расчета устойчивости карьерных откосов. - Караганда: «Санат-Полиграфия», 2009. - 332 с.
8. Быкадоров А.И., Свирко С.В., Зотов Е.В. Автоматизированный мониторинг за деформациями на угольных разрезах Кузбасса / Перспективы инновационного развития угольных регионов России. Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2014. – С. 456–458.
9. Волошина Д. А. Исследование геомеханического состояния прибортовых массивов карьеров // Молодой ученый. — 2017. — №36. — С. 15-18.
10. Горохов Д.А., Дорош Н.А., Абуева Е.В. Применение лазерного сканирования для мониторинга состояния прибортовых массивов на разрезе «Каратемир» // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2019. - № 1. - С. 190-198.
11. Ожигин С. Г. Маркшейдерско-геологический мониторинг состояния устойчивости карьерных откосов // Новости науки Казахстана. – Алматы : НЦНТИ, 2007. – С. 12-16.
12. Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б. Управление устойчивостью бортов карьеров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 3. – С. 30–34.
13. Бесимбаева О.Г., Хмырова Е.Н., Низаметдинов Ф.К., Олейникова Е.А. Оценка и прогноз устойчивости бортов карьера “Кентобе”//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2018. - № 6. - С. 120-126.
14. Голубко Б.П., Яковлев В.Н. Наблюдение за состоянием бортов // Известия Уральского государственного горного университета (Энергетика и рациональное природопользование). – 2005. – С. 33-37.
15. Шпаков П.С., Мирный И.Я., Долгоносов В.Н., Старостина О.В. Оценка параметров устойчивых внутренних отвалов на разрезе "Богатырь")//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2016. - № 2. - С. 345-356.
16. Е.Б. Михаленко, Н.Н. Загрядская, Н.Д. Беляев и др. - Инженерная геодезия. Современные методы геодезических измерений с использованием искусственных спутников Земли: учеб. пособие/Е. Б. Михаленко [и др.]; под научн. ред. Е. Б. Михаленко. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 80 с.

© В. А. Шаворин, А. С. Горилько, 2020