

К.О. Соколов

# АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КОНТУРОВ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

**Аннотация.** Предложен способ обработки данных георадиолокационных зондирований для выявления элементов структуры волнового поля, связанных с нарушениями горизонтально-слоистого строения осадочных горных пород. Способ основан на использовании функции Хэвисайда для описания элементов волнового поля, представляющих собой резкое изменение амплитудных значений соседних георадиолокационных трасс на одном и том же времени регистрации. Последующее дифференцирование преобразует исходное георадиолокационное волновое поле в местах резкого изменения амплитудных значений в последовательность дельта-функций, согласно свойствам функции Хэвисайда. Анализ распределения дельта-функций позволяет определить места наиболее вероятного расположения трещин и деформированных геологических структур. Предлагаемый способ обработки данных георадиолокации описан в виде блок-схемы алгоритма. Представлен пример обработки данных георадиолокационных исследований массива горных пород россыпного месторождения криолитозоны (Анабарский район Республики Саха (Якутия)), в результате которой установлено наличие структурного нарушения пересекающего всю исследуемую толщу горных пород, а также нарушений локального характера. Разработанный алгоритм позволяет использовать метод георадиолокации для изучения структурных нарушений в приповерхностных слоях горных пород месторождений криолитозоны для оптимизации параметров проведения буровзрывных работ.

**Ключевые слова:** геологические структуры, георадиолокация, алгоритм, нарушенность, трещиноватость, массив горных пород, криолитозона.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-138-144

Изучение строения верхней части разреза массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны в настоящее время производится различными методами геофизики [1]. Необходимость подобных исследований обоснована разнообразными факторами, в том числе и определением оптимальных параметров буровзрывных работ, так как состояния, на которые распространяются разрушения от заряда, зависят от количества трещин, пересекаемых взрывной волной [2–5]. Существуют различные методы изучения трещиноватости горных

пород, которые делятся на две основные группы по объекту исследования:

- непосредственно трещины различного масштаба;
- параметры естественных и искусственных физические поля, зависящие от структурно-тектонического строения массива горных пород.

Методы первой группы предоставляют наиболее достоверную информацию, так как исследования проводятся на обнажениях, из горных выработок или по особенностям рельефа, однако они весьма ограничены по охвату изучае-

мой площади. К методам второй группы относятся преимущественно методы геофизики, с помощью которых возможно изучение погребенных трещин различного размера.

Детальное исследование трещиноватости горных пород возможно, например, методом георадиолокации, благодаря хорошо развитой аппаратной части с современной элементной базой. Результаты георадиолокационных измерений показали достаточную эффективность и разрешающую способность для изучения нарушенности и трещиноватости горных пород с целью детализации горно-геологических условий россыпных месторождений криолитозоны [6]. В условиях многолетнемерзлых горных пород глубина исследования методом георадиолокации достигает 30 м, благодаря низкому затуханию электромагнитной энергии, что позволяет выявить и изучить распределение трещин в рыхлых отложениях и подстилающих коренных породах.

На современном этапе развития методического и программного обеспечения георадиолокации можно отметить отсутствие процедур автоматизированной обработки георадиолокационных данных для определения различного рода нарушенностей, что не позволяет проводить качественную и оперативную интерпретацию результатов измерений [7].

Разработка алгоритмов для автоматического выявления, например, разрывных нарушений по данным геофизических методов ведется преимущественно для сейсморазведки [8–13]. Алгоритмы основаны на анализе времени регистрации сигналов, отраженных от контрастных по своим свойствам границ раздела геологических сред, по разные стороны разрывного нарушения.

Возможности алгоритмов, описанных в публикациях, позволяют отслеживать

разрыв и смещение осей синфазности сигналов, представляющие собой вертикальные или наклонные линии. При изучении разрывных нарушений на больших глубинах этих признаков вполне достаточно, однако, строение рыхлых отложений криолитозоны сложное и волновая картина, получаемая в результате их зондирования, имеет структуру, в которой присутствуют различные геометрические элементы.

Для автоматического выявления всех особенностей структуры волновой картины, за исключением горизонтально-слоистых элементов, предлагается проводить поиск резкого изменения амплитудных характеристик сигналов, а не времени их регистрации. Данный подход весьма эффективен при обработке данных георадиолокации, полученных в режиме непрерывной съемки, т.к. в этом случае расстояние между точками зондирования может составлять первые десятки сантиметров и регистрируемые в этих точках георадиолокационные трассы практически одинаковы по радиофизическим параметрам, но при наличии трещины с вертикальным смещением слоев рыхлых отложений разница амплитуд сигналов  $\Delta A$  соседних трасс довольно велика даже при небольших смещениях  $\Delta t$  (рис. 1).

Красная линия на рис. 1, б представляет собой модулированную по амплитуде функцию Хэвисайда с отрицательным аргументом  $f(l) = \Delta A \cdot H(-l)$ , т.к. амплитуда сигнала в первой трассе больше, чем во второй, в противном случае аргумент положителен. Таким образом, георадиолокационную радарограмму можно представить в виде некоторого множества плоскостей со ступенчатыми переходами между ними. Резкий перепад амплитудных значений может сопровождать не только зондирование массива горных пород с вертикальным смещением слоев по трещине, но и локальные неод-

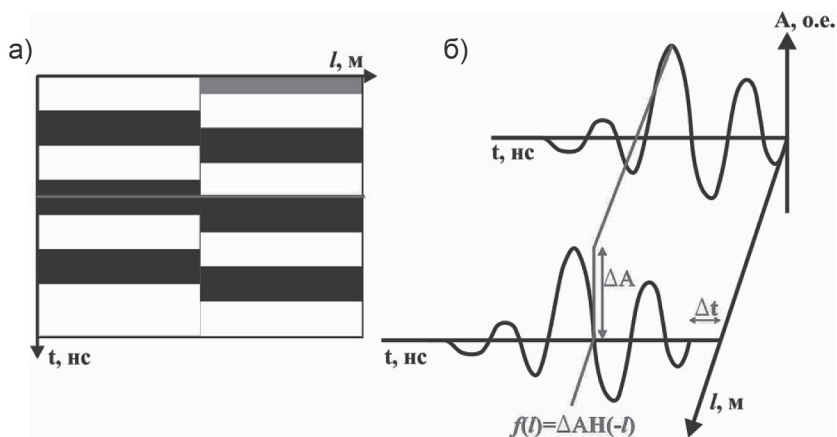


Рис. 1. Принцип поиска смещения осей синфазности георадиолокационных сигналов: схематичное изображение георадиолокационного разреза (а) и его амплитудно-временное представление (б)  
 Fig. 1. Principle of detecting displacement of events of ground penetrating radar signals: schematic of GPR section (a) and its amplitude–time representation (b)

нородности и различного рода помехи. Локальные неоднородности на месторождениях криолитозоны являются объектом поиска, так как, например, грубообломочные отложения, валунные галечники и проч. благоприятны для концентрации алмазов [1].

При проведении георадиолокационных исследований рыхлых отложений массива горных пород месторождений криолитозоны по разработанной на предыдущем этапе проекта методике основные помехи на радарограмме будут относиться к «воздушным», которые выявляются на основе стандартных процедур обработки [7].

Для выявления на радарограмме мест перепада амплитуд предлагается провести вычитание амплитудных значений, имеющих одно и то же время регистрации, для двух соседних трасс. Данная процедура аналогична дифференцированию функции  $f(l)$ , в результате которой, исходя из свойств функции Хэвисайда, искомое место перепада амплитуд будет обозначено модулированной дельта-функцией  $f(l)' = \pm \Delta A \cdot \delta(l)$ , при этом знак перед функцией будет показывать нап-

равление смещения слоев относительно текущей точки (минус — вниз, плюс — вверх).

Алгоритм, реализующий предлагаемый подход к обработке данных георадиолокации представлен на рис. 2, а. Результатом работы алгоритма является двумерный массив  $B$ , который, в зависимости от степени зашумленности исходных данных, может быть дополнительно обработан с целью увеличения соотношения сигнал/шум.

Апробация предлагаемого подхода к обработке данных георадиолокации проведена на примере разреза (рис. 2, б), полученного при изучении массива горных пород криолитозоны в Анабарском районе Республики Саха (Якутия) георадаром ОК0-2М с АБДЛ Тритон (центральная частота  $f_{\text{ц}} = 50$  МГц).

Представленный разрез преимущественно горизонтально-слоистого типа, в котором имеются структурные нарушения, обозначенные цифрами 1–4, 1 и 3 нарушениями локального характера, расположенные в рыхлых отложениях, являющиеся волновыми картинками слоисто-линзовидного типа [14], вторая на-

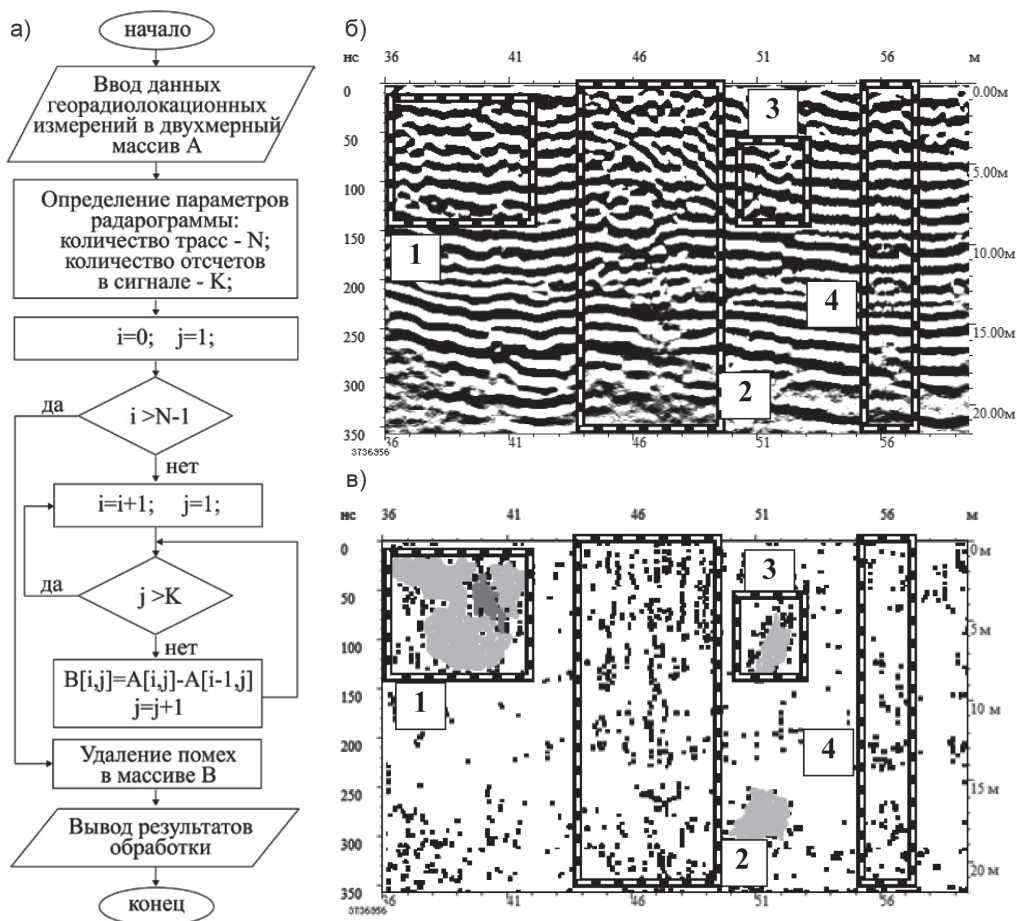


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки данных георадиолокации (а), фрагмент георадиолокационного разреза (б), результат его обработки (в)  
 Fig. 2. Diagram of GPR data processing algorithm (a), GPR section fragment (b), processing results (c)

рушенность пересекает всю толщу горных пород, доступную для исследования методом георадиолокации. До глубины 12 м она проявляется в виде косослоисто-линзовидного типа волновых картин, в интервале глубин 12–21 м, прослеживается по потере корреляции осей синфазности. Слабая выраженность нарушения на фоне горизонтально-слоистых сигналов и ее кажущееся «сужение» объясняется увеличением в 4–5 раз первой зоны Френеля [7], что приводит к пропорциональному снижению доли электромагнитной энергии распростра-

няющейся в нарушенных горных породах.

Область, отмеченная цифрой 4, малозаметна и выделяется по бугристому типу осей синфазности по всей глубине радарограммы. На рис. 2, в представлен результат обработки георадиолокационных данных по предлагаемому алгоритму. Черным цветом отмечены места резкого изменения значений амплитуд, в местах их скопления, особенно если они имеют линейную и протяженную форму или замкнутую линзовидную, вероятно наличие смещение осей синфазности сиг-

налов, характерных для трещин горных пород. На этой основе серым цветом обозначены локальные деформированные геологические структуры. В левом нижнем углу наблюдается область, представленная бесформенным скоплением черных точек и являющаяся следствием помех на обрабатываемом георадиолокационном разрезе.

В результате проведенных работ получен инструмент, позволяющий в автоматическом режиме выявить важные для интерпретации элементы структуры волнового поля и представить ее в более простом и наглядном виде. Данный аспект весьма важен при обработке гео-

физических данных, т.к. выявление мелких деталей и изучение закономерностей их расположения требует значительных усилий от оператора-интерпретатора при обработке результатов площадных измерений, насчитывающих десятки тысяч трасс.

Предлагаемый в данной работе алгоритм является первым этапом в работе по автоматизации анализа структуры радарограмм, в дальнейшем предполагается улучшение алгоритма с помощью использования обобщенного преобразования Хафа, которое позволит представить структуру георадиолокационного разреза в виде набора геометрических элементов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минорин В.Е., Подчасов В.М., Богатых И.Я., Граханов С.А., Шаталов В.И. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки разведки месторождений алмазов. Книга 2. Россыпные месторождения. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. — 424 с.
2. Лизункин М.В., Тюпин В.Н., Лизункин В.М. Установление радиуса зоны дробления трещиноватого напряженного горного массива при взрыве двух параллельно сближенных зарядов ВВ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 12. — С. 16—22.
3. Казаков Н.Н., Шляпин А.В., Лапиков И.Н. Дробление породы взрывом в верхнем слое карьерного уступа с учетом трещиноватости горных пород // Взрывное дело. — 2015. — № 114/71. — С. 56—70.
4. Тюпин В.Н., Анисимов В.Н. Влияние геолого-геофизических особенностей сложно-структурных массивов железистых кварцитов на показатели горнотехнологических и взрывных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 1. — С. 55—60.
5. Жариков С.Н., Шеменев В.Г., Кутуев В.А. Способы уточнения свойств горных пород при производстве буровзрывных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 74—80.
6. Соколов К.О. Возможности георадиолокации при изучении геомеханических свойств массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 6. — С. 113—115.
7. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. — М.: Изд-во МГУ, 2008. — 192 с.
8. Zhang B., Liu Y., Pelissier M., Hemstra N. Semiautomated fault interpretation based on seismic attributes // Interpretation. 2014. vol. 2. Issue 1. pp. SA11—SA19.
9. Wu X. Directional structure-tensor-based coherence to detect seismic faults and channels // Geophysics. 2017. vol. 82. Issue 2. pp. A13—A17.
10. Botter C., Cardozo N., Qu D., Tveranger J., Kolyukhin D. Seismic characterization of fault facies models // Interpretation. 2017. vol. 5. Issue 4. pp. SP9—SP26.
11. Cohen I., Coult N., Vassiliou A. Detection and extraction of fault surfaces in 3D seismic data: Geophysics, 2006, 71, no. 4, pp. 21—27.
12. Wu X., Zhu Z. Methods to enhance seismic faults and construct fault surfaces // Computers & Geosciences. 2017. vol. 107. pp. 37—48.
13. Hale D. Methods to compute fault images extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images // Geophysics. 2013. vol. 78. Issue 2. pp. O33—O43.
14. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие — М.: Изд-во МГУ, 2004. — 153 с. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Соколов Кирил Олегович — кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник, e-mail: k.sokolov@ro.ru,  
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 10, pp. 138–144.

### Algorithm of the ground penetrating radar data processing to delineate deformable geological structures

Sokolov K.O., Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher, e-mail: k.sokolov@ro.ru,  
Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, 677018, Yakutsk, Russia.

**Abstract.** The method of processing ground penetrating radar data to reveal wave field structure elements connected with damage of horizontal lamination of sedimentary rocks is proposed. The method is based on the Heaviside function used to describe wave field elements in the form of abrupt changes in amplitudes in the neighbor radar paths at the same time of recording. The further differentiation converts initial wave field at the points of amplitude jumps into a sequence of deltas in accordance with the properties of the Heaviside function. The analysis of the distribution of deltas makes it possible to detect most probable places of fractures and deformed geological structures. The proposed method of GPR data processing is described in the form of a control flow chart. An example of GPR data processing is given in terms of a placer deposit in permafrost zone (Anabar district, Republic of Sakha (Yakutia)). As a result, a structural discontinuity across the whole thickness of the deposit and enclosing rock mass was detected alongside local dislocations. The developed algorithm allows using the ground penetrating radar method to study structural damages in enclosing rocks of mineral deposits in permafrost subsurface to optimize drilling and blasting designs.

**Key words:** geological structures, ground penetrating radar, algorithm, damage, jointing, rock mass, permafrost zone.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-138-144

## REFERENCES

1. Minorin V.E., Podchasov V.M., Bogatykh I.Ya., Grakhanov S.A., Shatalov V.I. *Geologiya, prognozirovaniye, metodika poiskov, otsenkii razvedki mestorozhdeniy almazov*. Kniga 2. Rossyapnye mestorozhdeniya [Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки разведки месторождений алмазов. Book 2. Рассыпные месторождения], Yakutsk, Izd-vo SO RAN, 2004, 424 p.
2. Lizunkin M.V., Tyupin V.N., Lizunkin V.M. Ustanovlenie radiusa zony drobeniya treshchinovotogo napryazhennogo gornogo massiva pri vzryve dvukh parallel'no sblizhennykh zaryadov VV [Determination of fragmentation zone radius in jointed high-stress rock mass under blasting of two parallel closely-spaced charges]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 12, pp. 16–22. [In Russ].
3. Kazakov N.N., Shlyapin A.V., Lapikov I.N. Drobleniye porody vzryvom v verkhnem sloe kar'ernogo ustupa s uchetom treshchinovosti gornyykh porod [Fragmentation of rocks by blasting in the upper layer of pit wall bench with regard to jointing]. *Vzryvnoye delo*. 2015, no 114/71, pp. 56–70. [In Russ].
4. Tyupin V.N., Anisimov V.N. Vliyaniye geologo-geofizicheskikh osobennostey slozhnostrukturnyykh massivov zhelezistykh kvartsitov na pokazateli gornotekhnologicheskikh i vzryvnykh rabot [Effect of geological-geophysical features of complex-structure ferruginous quartzite rock mass on process blasting performance]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2018, no 1, pp. 55–60. [In Russ].
5. Zharikov S.N., Shemenov V.G., Kutuev V.A. Sposoby utochneniya svoystv gornyykh porod pri proizvodstve burovzryvnykh rabot [Methods of adjustment of rock properties during drilling-and-blasting]. *Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy*. 2017, vol. 9, no 1, pp. 74–80. [In Russ].
6. Sokolov K.O. Vozmozhnosti georadiolokatsii pri izuchenii geomekhanicheskikh svoystv massiva gornyykh porod [Ground penetrating radar capabilities in studying geomechanical properties of rock mass]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 113–115. [In Russ].
7. Starovoytov A.V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh* [Interpretation of ground penetrating radar data], Moscow, Izd-vo MGU, 2008, 192 p.
8. Zhang B., Liu Y., Pelissier M., Hemstra N. Semiautomated fault interpretation based on seismic attributes. *Interpretation*. 2014. vol. 2. Issue 1. pp. SA11–SA19.



9. Wu X. Directional structure-tensor-based coherence to detect seismic faults and channels. *Geophysics*. 2017. vol. 82. Issue 2. pp. A13–A17.

10. Botter C., Cardozo N., Qu D., Tveranger J., Kolyukhin D. Seismic characterization of fault facies models. *Interpretation*. 2017. vol. 5. Issue 4. pp. SP9–SP26.

11. Cohen I., Coult N., Vassiliou A. Detection and extraction of fault surfaces in 3D seismic data. *Geophysics*, 2006, 71, no. 4, pp. 21–27.

12. Wu X., Zhu Z. Methods to enhance seismic faults and construct fault surfaces. *Computers & Geosciences*. 2017. vol. 107. pp. 37–48.

13. Hale D. Methods to compute fault images extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images. *Geophysics*. 2013. vol. 78. Issue 2. pp.033–043.

14. Vladov M.L., Starovoytov A.V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu*. Uchebnoe posobie [Introduction to ground penetrating radar. Educational aid], Moscow, Izd-vo MGU, 2004, 153 p.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### МОНИТОРИНГОВАЯ СИСТЕМА РЕМОНТА ТЕХНИКИ

(2018, № 6, СВ 28, 8 с.)

Чооду Остап Андреевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент, e-mail: ostep1981@mail.ru,

Монгуш Сылдыс Чамбаевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент,

Сандан Руслан Николаевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент, e-mail: ruzzzlan@mail.ru,

Балзанай Сылдыс Васильевич<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: b\_syldys@mail.ru,

<sup>1</sup> Тувинский государственный университет.

Проведен анализ технической литературы по оптимизации параметров производственных процессов с учетом специфических особенностей производства, начиная с природно-климатических факторов и др. Предложена система непрерывного автоматизированного контроля за техническим состоянием горно-строительных, технологических машин и оборудования, которая позволяет повысить уровень надежности и безопасности эксплуатации техники. Мониторинговая система ремонта отражается на технико-экономических параметрах специализированных и горных машин. Суть системы заключается во внедрении контрольно-диагностических средств непрерывного контроля в узлы и агрегаты техники. Для примера рассмотрен шагающий экскаватор 10/70, эксплуатирующийся в горнодобывающем предприятии ООО «Тувинская горнорудная компания». Выявлены наиболее проблемные зоны в экскаваторе, где необходимо устанавливать контрольно-диагностические средства.

Ключевые слова: причины отказов, мониторинг, автоматизация, техническая эксплуатация, система ремонта, специализированные и горные машины, экскаватор, контрольно-диагностические средства.

### MONITORING SYSTEM REPAIR

Choodu O.A.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: ostep1981@mail.ru,

Mongush S.Ch.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

e-mail: syldys-mongush@yandex.ru,

Sandan R.N.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: ruzzzlan@mail.ru,

Balzanay S.V.<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: b\_syldys@mail.ru,

<sup>1</sup> Tuva State University, 667000, Kyzyl, Tuva Republic, Russia.

The analysis of the technical literature on parameter optimization of production processes taking into account the specific features of the production, starting with natural-climatic factors, etc. To solve problems during preventive maintenance we propose a new system for continuous automated monitoring of technical condition of mining and construction, production machinery and equipment. This system allows to increase the level of reliability and safety of equipment operation. In turn, the monitoring system of repair is reflected in the technical and economic parameters of specialized and mining machines. The essence of the system is the introduction of control and diagnostic tools of continuous monitoring in units and assemblies of equipment. For example, the walking excavator 10/70, operated in the mining company «Tuva mining company». The most problematic areas in the excavator where it is necessary to install control and diagnostic tools are revealed.

Key words: causes of failures, monitoring, automation, technical operation, repair system, specialized and mining machines, excavator, control and diagnostic tools.