

УДК 622.271.33:621.396.96

Усанов Сергей Валерьевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
сдвижения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, Екатеринбург, Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: usv@igduran.ru

Усанова Анна Витальевна

научный сотрудник,
лаборатория сдвижения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: anne.usanova@gmail.com

**КОГЕРЕНТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ
ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ КАРЬЕРА
ВСЛЕДСТВИЕ ОПОЛЗНЯ БОРТА
ПО КОСМИЧЕСКИМ
РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СНИМКАМ****Аннотация:*

В результате деформирования борта произошла авария при строительстве подпорных стенок дробильного комплекса на борту одного из крупнейших карьеров в мире. По видимым трещинам область деформирования составляет 5 га. Для обнаружения границ распространения деформаций использован метод когерентного обнаружения изменений поверхности борта вследствие аварий. На основе сопоставления архивных данных космической съемки с данными маркшейдерских наблюдений и априорной информацией установлено, что изменения борта распространились на 14 га, охватив огромную зону, расположенную выше оползня.

Ключевые слова: карьер, дробильно-конвейерный комплекс, оползень, раскрытие трещин, авария, космические аппараты, радиолокационные изображения, когерентное обнаружение, изменения поверхности.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.014

Usanov Sergei V.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of Rock Displacement,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: usv@igduran.ru

Usanova Anna V.

Research Worker,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: anne.usanova@gmail.com

**COHERENT DETECTION OF CHANGES
OF QUARRY SURFACE AS A RESULT
OF SIDE LANDSLIDE USING SATELLITE
RADAR IMAGES***Abstract:*

Because of the deformation of the side, an accident occurred during the construction of the retaining walls of the crushing complex aboard one of the largest quarries in the world. The deformation area along the visible cracks was up to five hectares. To detect the boundaries of deformations outspread, the method of coherent detection of changes in the side surface caused by the accidents was used. Based on a comparison of the archival space survey data with the data of mine surveying and a priori information, we established that the changes in the side have expanded over 14 hectares, covering a huge zone located above the landslide.

Key words: quarry, crushing and conveyor complex, landslide, cracking, accident, spacecraft, radar images, coherent detection, surface changes

Введение

Качарский карьер можно отнести к крупнейшим мировым карьерам. Его фактическая глубина составляет около 500 м, а проектная глубина – 764 м. Наклонная длина борта порядка 1600 м. В настоящее время карьер отработан до отметки -248 м. В разработке находится Северный (около 90 % запасов магнетитовых руд) и Южный участки, на которых карьером планируется отработать около 0,87 млрд т руды. Диаметр карьера по поверхности превышает 3600 м. Объем вынутой горной массы к концу разработки превысит 11 млрд м³.

Перемещения таких колоссальных объемов горной массы неизбежно инициируют изменение изостатического равновесия в прибортовом горном массиве, которое длится десятки лет и сопровождается геодинамическими подвижками в вертикальной и горизонтальной плоскостях [1]. Характер изменения подвижек бывает плавным, размытым во времени, а может проявиться резко, с высокими скоростями деформаций и

* Работа выполнена в рамках Госзадания №007-00293-18-00, тема № 0405-2019-0007.

сейсмическим эффектом. Геодинамические движения массива вызывают непрогнозируемые деформации, которые пока не учитываются при расчетах бортов карьеров. Именно такой случай и произошел на юго-западном борту Качарского карьера в районе строительства площадки для размещения дробилок.

В карьере сложные инженерно-геологические условия обусловлены наличием осадочной толщи рыхлых отложений мощностью до 200 м, поверхностей ослабления в скальных породах, направленных в сторону выемки, а также наличием пяти водоносных горизонтов. Углы откоса бортов карьера на предельном контуре до отметки -570 м предусмотрены по рыхлым покровным отложениям 22 – 25°, а по скальным породам 36° – 38°.

Напластование скальных пород под углом $\approx 30^\circ$ со стороны севера и юго-запада в борт карьера создают неблагоприятные условия устойчивости этой части прибортового массива. Это подтверждается практикой отработки (рис. 1). Однако с учетом развития горных работ юго-западный борт был единственным местом для размещения площадки дробильно-конвейерного комплекса (ДКК), внедряемого на карьере циклично-поточной технологии (ЦПТ).

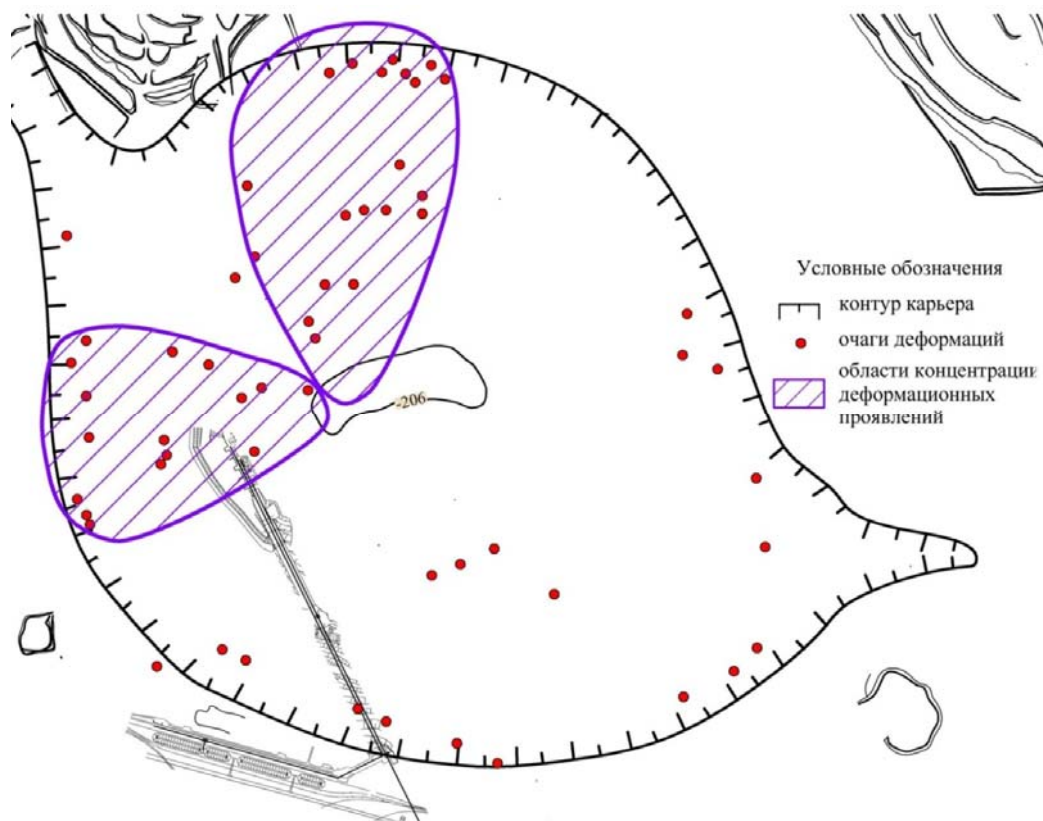


Рис. 1. Распределение деформаций по бортам Качарского карьера

В 2015 г. на Качарском карьере во время строительства ДКК на юго-западном борту произошла деформация горного массива. С отметки -30 м до -160 м и протяженностью по фронту 550 м развились заколы уступов, проседания съездов и технологических дорог на величину до 5 м. В результате аварии остановлено строительство ДКК стоимостью сотни миллионов евро.

Деформированный участок борта был огромен, а параметры процессов опасны для доступа исследователей к центральной части оползня, чтобы определить перспективы продолжения строительства ДКК и сроки, когда можно приступить к восстановлению борта. В то время исследования выполнялись только в краевых частях оползня, что не давало полноценной оценки. В результате строительство ДКК было отложено на неопределенный срок.

Развитие аварии и параметры деформаций

Скрытая форма подготовки оползня происходила по результатам инструментальных наблюдений с начала 2015 г. Активное деформирование юго-западного борта произошло в период строительства подпорных железобетонных стенок дробильного комплекса осенью того же года. К этому времени стенки были возведены на высоту 5 м.

Смещения грунтовых реперов с марта до сентября интерпретировались как механические воздействия строительных работ на репер. 21 сентября на площадке строительства образовалась трещина длиной 58 м, а с 1 октября за двое суток трещина раскрылась на 0,25 м. Скорость раскрытия трещины стала возрастать. Увеличилась ее длина и образовались террасы.

20 октября остановлено строительство подпорной стенки, закрыт доступ людей и техники в деформирующуюся часть юго-западного борта. К 24 октября скорость оседания и смещения грунтовых реперов по горизонтали составляла порядка 0,2 м/сут. Оседания превысили 1,2 м, горизонтальные смещения достигли 0,5 м.

Эпицентр нарушений и проседаний сформировался под северо-западной подпорной стенкой, южный угол которой повис над опустившимся массивом (рис. 2). Одна трещина от эпицентра разрушения распространилась в северо-западном направлении на 300 м, а две – в юго-восточном направлении на 220 м. Площадь, охваченная трещинами, составила приблизительно 50 000 м².



Рис. 2. Эпицентр аварии на борту карьера при строительстве подпорных стенок

Самая активная фаза протекала с октября по ноябрь 2015 г., когда сохранялся высокий риск отрыва тела оползня и схода на дно карьера. Средние скорости смещений и оседаний в ноябре достигали 100 мм/сут и за два месяца приняли колебательный характер с величинами, близкими к 10 мм/сут. Анализ результатов наблюдений показы-

вает, что наиболее активная фаза деформирования завершилась к 13.01.2016, когда снизились величины (рис. 3) и скорости смещения контролируемых точек. Дальнейший ход процесса деформирования приобрел постоянный тренд к снижению, а скорости деформаций приняли колебательный характер с величинами, близкими к 10 мм/сут.

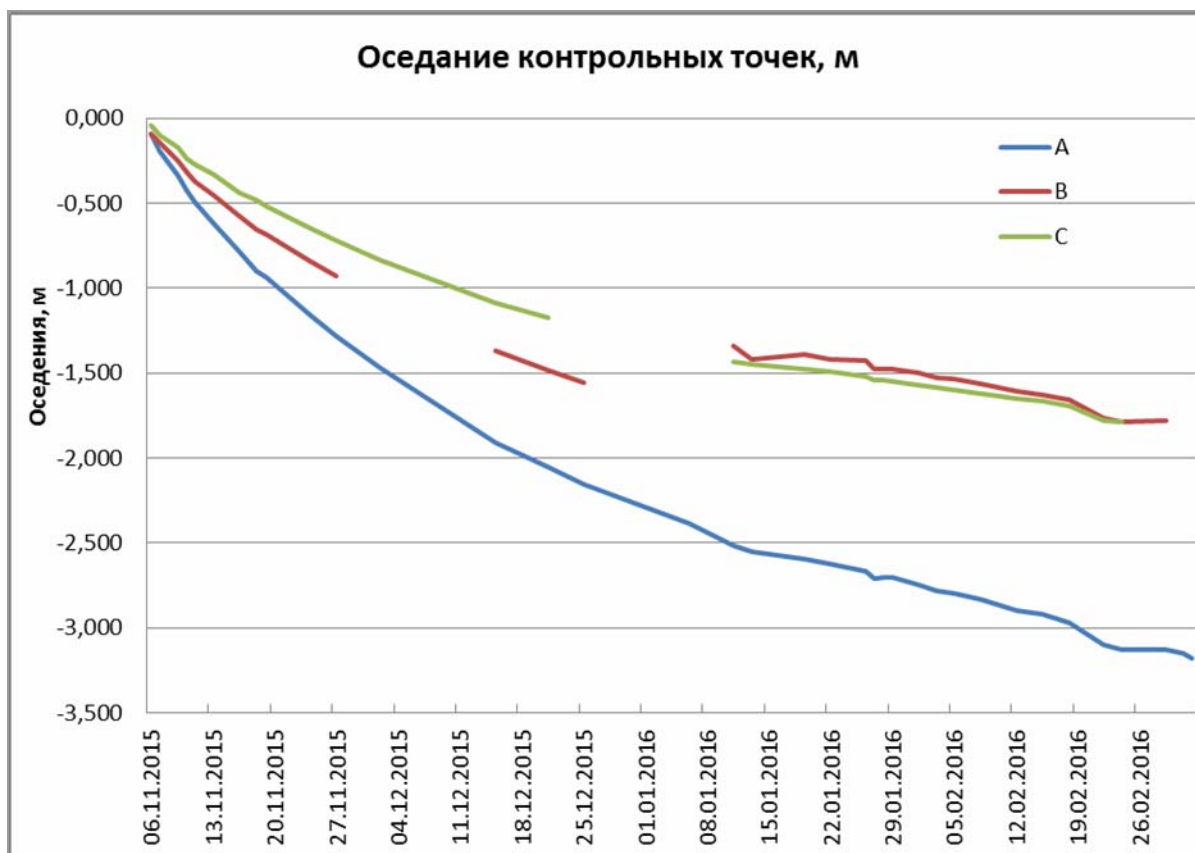


Рис. 3. График оседания контрольных точек на гор. -30 м

По высоте борта деформационными процессами был охвачен массив первоначально до гор. -95 м, а со временем распространился до гор. -160 м, составив по высоте 130 м. Массив горных пород между образовавшимися главными трещинами разделился на несколько обособленных деформационных участков, где происходят локальные деформации проседания, сдвиги, выполаживание уступов, уплотнение деструктурированных пород, обрушение их в раскрытые трещины. На гор. -30 м проседания отдельных участков по инструментальным наблюдениям превысили 5 м.

В результате обрушения массива непосредственно на площадке строительства подпорной стенки ДКК на гор. -30 м сложилась крайне тяжелая ситуация с продолжением строительства ЦПТ. Необходимо оценить полный масштаб деформации на юго-западном борту, чтобы принять решения относительно восстановления борта и продолжения строительства ЦПТ.

Методы исследования

Для определения границ деформированной области в карьере, оценки наиболее устойчивых участков для расположения ЦПТ предпринята попытка исследования параметров деформирования всего юго-западного борта с помощью радиолокационной интерферометрии [2 – 4]. Для этого использованы архивные снимки [5, 6] космических аппаратов (табл. 1).

Таблица 1
Номенклатура использованных радиолокационных архивных снимков

Наименование спутника	ID снимка	Режим съемки	Номинальное пространственное расширение, м	Дата съемки
ALOS-2	ALOS2065751060-150811	Fine	10	11.08.2015
ALOS-2	ALOS2067821060-150825	Fine	10	25.08.2015
ALOS-2	ALOS2125781060-160920	Fine	10	20.09.2016
ALOS-2	ALOS2179601060-170919	Fine	10	19.09.2017
ALOS-2	ALOS2229281060-180821	Fine	10	21.08.2018

В результате обработки радиолокационных космических снимков за 08.2015 и 09.2016 выполнено когерентное обнаружение изменений в Качарском карьере. Когерентность представляет собой коэффициент корреляции фаз двух радиолокационных снимков (рис. 4). Это мера изменений отражающей поверхности, произошедших за период между съемками интерферометрической пары. Этот метод широко используется при поиске участков деформаций зданий и рельефа [7 – 10].

Радиолокационные данные содержат в себе амплитуду и фазу радиоволны. Амплитуда позволяет распознавать объекты и их состояние, а фазовая составляющая является основой для последующего определения высот и смещений поверхности.

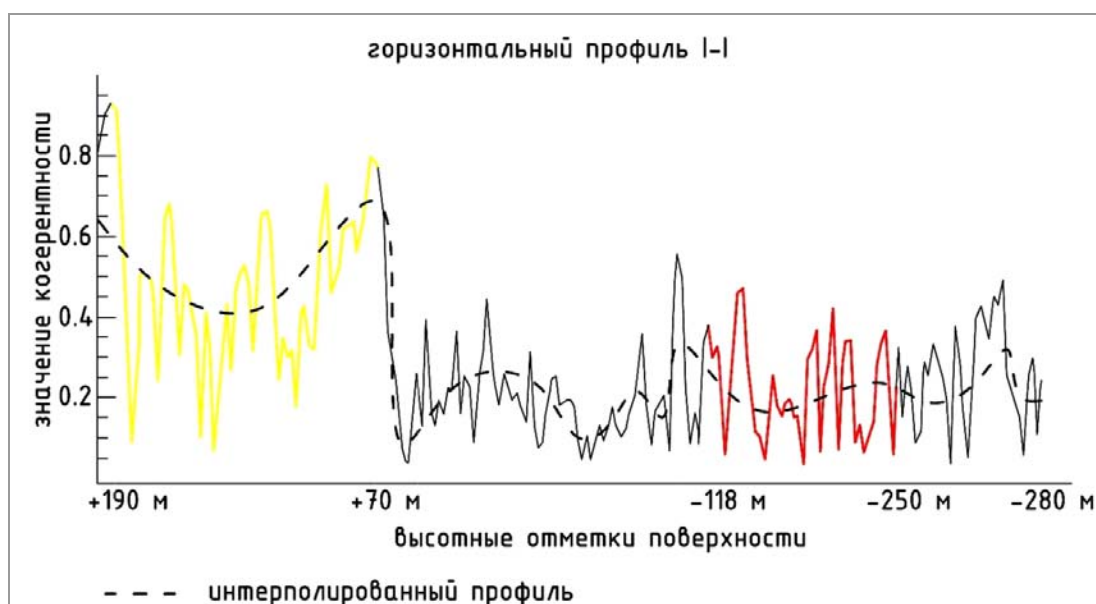


Рис. 4. График изменения когерентности по юго-западному борту карьера вдоль оползня

Когерентное обнаружение показывает, что фактически изменения произошли почти по всему западному сектору карьера, а не как это было отмечено по видимым нарушениям уступов карьера (см. рис. 4). Форма и размеры области изменений идентичны области с наибольшим количеством негативных факторов, снижающих устойчивость борта, которая определена в ранее выполненных работах.

Результаты исследования

Методом когерентного обнаружения изменений отражающей поверхности, произошедших за период между съемками интерферометрической пары 08.2015 и 11.2016, составлена карта изменений поверхности борта карьера. Полученные экспериментальным путем данные свидетельствуют о том, что изменения поверхности борта в результате аварии распространились на площади 140 000 м², что в 3,5 раза превышает размеры эпицентра деформации, определенного при натурном обследовании по крайним видимым трещинам (рис. 5).

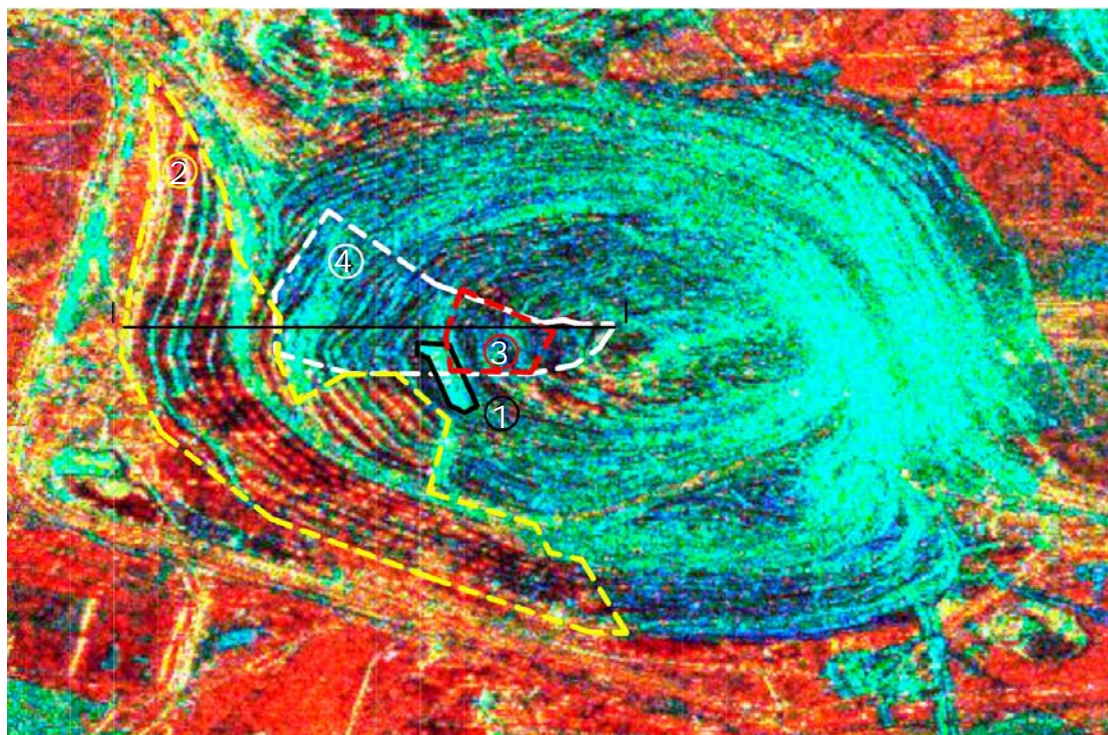


Рис. 5. Интерферометрическое когерентное обнаружение изменений поверхности борта карьера по архивным данным с космических аппаратов за период 2015 – 2016 гг.

после крупной деформации:

1 – Дробильно-конвейерный комплекс на борту карьера; 2 – участок борта над оползнем, который не претерпел изменений, когерентность 0,7 – 1; 3 – деформация борта по крайним видимым трещинам (эпицентр), когерентность 0,1 – 0,3; 4 – область изменений поверхности борта по данным радарной интерферометрии с когерентностью 0,3 – 0,5

Заключение

Согласно исследованиям, принята версия о деформации борта без выпора горной массы в дно карьера, которая постепенно затухнет. Результатом дополнительных исследований стали рекомендации по восстановлению борта без строительства пригруза объемом более 1,5 млн м³ и, как следствие, без потери рудных запасов. Это позволило приступить к ремонтно-восстановительным работам на площадках деформированных уступов. Такое решение позволяет оставить в работе более миллиона тонн запасов руды и избежать затрат на формирование пригруза.

В настоящее время параметры деформационных процессов юго-западного борта, такие как масштабный эффект, условия начала, продолжительность развития, условия прекращения и другие, исследованы недостаточно, поэтому и методы противодействия этим явлениям пока не полностью ясны.

Список литературы

1. Корнилков С.В., Панжин А.А., Балек А.Е., Зубков А.В., Мельник В.В., Феклистов Ю.Г., Коновалова Ю.П., Пустуев А.Л., Криницын Р.В., Замятин А.Л., Усанов С.В., 2018. Уральская научная школа геомехаников: фундаментальные и прикладные исследования. *Проблемы недропользования*, № 3 (18), С. 10 – 20. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.010
2. Захарова Л.Н., Захаров А.И., 2019. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурья по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 16., № 2, С. 273–277.

3. AndraBaduge A. W., Henschel M. D., Hobbs S., Buehler S. A., Ekman J., Lehrbass B., 2016. Seasonal variation of coherence in SAR interferograms in Kiruna, Northern Sweden. *Intern. J. Remote Sensing*, V. 37., No. 2., P. 370–387.
4. Pepe A., Calò F.A., 2017. Review of Interferometric Synthetic Aperture Radar Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Applied Sciences*, P. 1–39.
5. Усанова А.В., 2018. Особенности исследования деформаций поверхности при подземной разработке Соколовского железорудного месторождения на основе архивных радарных снимков. *Маркшейдерия и недропользование*, № 3 (95), С. 29 – 35.
6. Усанова А.В., Усанов С.В., 2018. Мониторинг сдвижения земной поверхности при разработке Соколовско-Сарбайского месторождения методом радарной интерферометрии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 4, С. 28 – 33.
7. Достовалов М.Ю., Трошко К.А., 2020. Экспериментальная оценка когерентности по амплитудным изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 17, № 2, С. 9 – 18.
8. Manabu Watanabe, Rajesh Bahadur Thapa, Tsuneo Ohsumi, Hiroyuki Fujiwara, Chinatsu Yonezawa, Naoya Tomii&Sinichi Suzuki, 2016. Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2. *Earth, Planets and Space*, vol. 68, Article number: 131
9. Tanel Tamm, Karlis Zalite, KaupoVoormansik, LiinaTalgre, 2016. Relating Sentinel-1 Interferometric Coherence to Mowing Events on Grasslands. *Remote Sensing*, 8(10), 802 DOI:10.3390/rs8100802.
10. Захарова Л.Н., Захаров А.И., 2019. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 16., № 2, С. 273 – 277.

References

1. Kornilkov S.V., Panzhin A.A., Balek A.E., Zubkov A.V., Mel'nik V.V., Feklistov Yu.G., Konovalova Yu.P., Pustuev A.L., Krinitsyn R.V., Zamyatin A.L., Usanov S.V., 2018. *Ural'skaya nauchnaya shkola geomekhanikov: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* [Ural scientific school of geomechanics: fundamental and applied research]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3 (18), P. 10 – 20. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.010
2. Zakharova L.N., Zakharov A.I., 2019. *Nablyudenie dinamiki zony opolznaya na reke Bureya po dannym interferometrcheskoi s'emki Sentinel-1 v 2017–2018 gg.* [Dynamics observation of the landslide zone on Bureya River according to the data of the Sentinel-1 interferometric survey in 2017-2018]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 16., № 2, P. 273–277.
3. AndraBaduge A. W., Henschel M. D., Hobbs S., Buehler S. A., Ekman J., Lehrbass B., 2016. Seasonal variation of coherence in SAR interferograms in Kiruna, Northern Sweden. *Intern. J. Remote Sensing*, Vol. 37., No. 2., P. 370–387.
4. Pepe A., Calò F.A., 2017. Review of Interferometric Synthetic Aperture Radar Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Applied Sciences*, P. 1–39.
5. Usanova A.V., 2018. *Osobennosti issledovaniya deformatsii poverkhnosti pri podzemnoi razrabotke Sokolovskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya na osnove arkhivnykh radarnykh snimkov* [Features of the study of surface deformations during underground mining of the Sokolov iron ore deposit based on archived radar images]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, № 3 (95), P. 29 – 35.

6. Usanova A.V., Usanov S.V., 2018. *Monitoring sdvizheniya zemnoi poverkhnosti pri razrabotke Sokolovsko-Sarbaiskogo mestorozhdeniya metodom radarnoi interferometrii* [Monitoring of the earth's surface movement during the development of the Sokolovsko-Sarbayskoye field by radar interferometry]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 4, P. 28 – 33.

7. Dostovalov M.Yu., Troshko K.A., 2020. *Eksperimental'naya otsenka kogerentnosti po amplitudnym izobrazheniyam radiolokatora s sintezirovannoi aperturoi Sentinel-1* [Experimental evaluation of coherence from the amplitude images of the Sentinel-1 synthetic aperture radar]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 17, № 2, P. 9 – 18.

8. Manabu Watanabe, Rajesh Bahadur Thapa, Tsuneo Ohsumi, Hiroyuki Fujiwara, Chinatsu Yonezawa, Naoya Tomii & Sinichi Suzuki, 2016. Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2. *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, Article number: 131

9. Tanel Tamm, Karlis Zalite, Kaupo Voormansik, Liina Talgre, 2016. Relating Sentinel-1 Interferometric Coherence to Mowing Events on Grasslands. *Remote Sensing*, 8(10), 802 DOI:10.3390/rs8100802.

10. Zakharova L.N., Zakharov A.I., 2019. *Nablyudenie dinamiki zony opolznya na reke Bureya po dannym interferometricheskoi s"emki Sentinel-1 v 2017–2018 gg.* [Dynamics observation of the landslide zone on Bureya River according to the data of the Sentinel-1 interferometric survey in 2017-2018]. // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 16., № 2, P. 273 – 277.