

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РИДДЕРСКОГО ГОКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В. В. Мусихин, В. А. Тютюкова, Н. М. Харина

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь, Россия

Аннотация: В статье приведены результаты определения оседаний земной поверхности по результатам интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутника Sentinel-1 территории Риддерского ГОКа в 2021 году. Установлено, что точность определения оседаний земной поверхности зависит от количества данных и наличия случайных, систематических и грубых ошибок для данных Sentinel-1. Показано, что при увеличении числа интерферограмм, точность определения оседаний земной поверхности повышается до определённого значения. Выявлено, что для достижения наивысшей точности определения среднегодовых скоростей оседаний необходимо производить не менее 15 циклов съёмок в сезон. Результаты исследований могут быть полезными при определении количества необходимых данных для выполнения интерферометрической обработки результатов космического радиолокационного зондирования.

Ключевые слова: радиолокационная съёмка, радарная интерферометрия, деформации, точечный анализ, точность определения оседаний, мониторинг деформационных процессов.

EVALUATION OF THE ACCURACY OF DETERMINING THE SUBSIDENCE OF THE EARTH'S SURFACE OF THE RIDDER GOK BASED ON THE RESULTS OF INTERFEROMETRIC PROCESSING OF SPACE RADAR SENSING DATA

V.V. Musikhin, V.A. Tiutiukova, N.M. Kharina

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia

Abstract: The article presents the results of determining the subsidence of the Earth's surface based on the results of interferometric processing of space radar data from the Sentinel-1 satellite of the territory of Ridder Mining and Processing Division in 2021. It was found that the accuracy of determining the subsidence of the Earth's surface depends on the number of data and the presence of random, systematic, and gross errors for Sentinel-1 data. It is shown that with an increase in the number of interferograms, the accuracy of land surface subsidence detection increases up to a certain value. It is revealed that to achieve the highest accuracy of determining the annual mean subsidence velocities, at least 15 cycles of surveys per season should be carried out. The results of the research may be useful in determining the amount of data needed to perform interferometric processing of the results of space radar sounding.

Keywords: radar imaging, radar interferometry, deformation, spot analysis, settling accuracy, deformation monitoring.

В настоящее время в отечественных и зарубежных прикладных и научно-исследовательских работах в области оценки оседаний земной поверхности методом радарной интерферометрии широко используются свободно распространяемые данные дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли с космических аппаратов (КА) Sentinel-1a и Sentinel-1b [1-3]. Эти данные позволяют определять оседания земной поверхности, в том числе вызванные вследствие добычи полезных ископаемых [4-6]. В связи с этим одной из прикладных задач на производстве является априорная

оценка точности полученных карт оседаний [7]. Учитывая то, что методы интерферометрической обработки данных не имеют стандартной методики определения оседаний почвы, то в большинстве случаев интерпретация результатов основывается исключительно на возможностях используемого программного обеспечения и собственном опыте исполнителей [8]. В результате чего ошибки различного характера могут содержаться в результатах работ, и зачастую, не выявляться. Таким образом, задача данной работы свелась к оценке точности определения оседаний почв методом ра-

дарной интерферометрии в зависимости от объема исходных ДДЗ, и наличия ошибок различного рода.

Цель исследований. Оценка точности определения оседаний территории Риддерского ГОКа по результатам интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутника Sentinel-1.

Объект исследований. Район территории Казахстана – Риддерский ГОК. Риддер-Сокольное полиметаллическое месторождение разрабатывается ТОО «КАЗЦИНК».

Методика исследований. Для обработки ДДЗ (сцен) со спутника Sentinel-1a использовалось программное средство GAMMA (GAMMA Remote Sensing, Швейцария) [9]. Количество использованных сцен сезона 2021 года с КА Sentinel-1a составило 10 штук (таблица 1).

Таблица 1 / Table 1
Даты съемок КА Sentinel-1a / Filming dates for the Sentinel-1a spacecraft.

№ сцены / Scene number	Дата съемки / Shooting date	№ сцены / Scene number	Дата съемки / Shooting date
1	22.03.2021	6	21.05.2021
2	03.04.2021	7	02.06.2021
3	15.04.2021	8	14.06.2021
4	27.04.2021	9	26.06.2021
5	09.05.2021	10	20.07.2021

Известно, что дифференциальная интерферограмма отображает смещение фаз принятого сигнала обусловленного, как сдвигами земной поверхности, так и случайными ошибками задержки фаз в атмосфере [10-12]. Основной проблемой радарной интерферометрии является задача установления абсолютных значений таких смещений в пределах исследуемой территории. Ошибки, возникающие вследствие определения неверного количества смещений фаз, могут считаться грубыми [10]. Проблема интерпретации развернутых дифференциальных интерферограмм всегда заключается в том, чтобы правильно выявить, и отбраковать карты оседаний с «разрывами» фаз, так как данные ошибки могут достигать больших порядков, часто превышающих значения самих определяемых оседаний [8].

В рамках работы в программе GAMMA выполнялось площадное развертывание фазы [11]. Для каждой интерферограммы была получена карта оседаний почв без корреляционной пороговой маски, то есть осуществлялось развертывание по всей площади в пределах квадрата 740×740 пикселей (10,5×15,5 км). Каждая из интерферограмм в зависимости от погодных условий и степени изменчивости поверхности содержала в себе ошибки, которые могли быть как случайными, так и грубыми. Грубые ошибки развертывания фаз возникают, когда в условиях низкой когерентности фазового сигнала, происходит неясное нарастание или уменьшение смещения фазы от пикселя к пикселю, и осуществляется неверное определение этого смещения.

В результате смешанной компоновки на основе небольшого количества съемок можно произвести значительное число интерферограмм. Количество интерферограмм будет

считаться по таблице пар сцен, где строки и столбцы будут означать порядковый номер съемок. В этом случае суммарное количество интерферограмм будет равно половине площади такой таблицы, за вычетом одной одноименной пары в каждой строке. Выражение максимального количества интерферограмм определяется как половина произведения суммы строк минус 1 и суммы столбцов

$$n_i = 0,5n_{cc} \times (n_{cc} - 1), \quad (1)$$

где n_{cc} – это количество используемых сцен.

Для уменьшения влияния оседаний земной поверхности при определении случайных и грубых смещений фаз построение интерферограмм ограничивалось 50 днями. Таким образом, на основе 10 сцен было получено не 45 интерферограмм, а 29. Среди которых необходимо было отделить грубые ошибки от случайных и оценить величину случайной ошибки.

Полученные карты оседаний почвы методом радарной интерферометрии обычно сопоставляют с результатами нивелирования, и делают, таким образом, объективную оценку точности [14]. Однако радарная интерферометрия предоставляет преимущество перед нивелированием, когда необходимо получить карту оседаний на большой застроенной площади. В этом случае требуется практическая оценка точности карт оседаний. И, для повышения точности определения оседаний прибегают к двум различным подходам повышения точности.

Первый подход – это производство многократных измерений, при которых грубая ошибка будет вносить минимальный вклад [15]. Но, в этом случае потребуется большое количество исходных данных – от 20-30 сцен и более. Учитывая, что в течение сезона невозможно часто получить многократное количество съемок, прибегают ко второму подходу – визуальной выбраковке развернутых интерферограмм. На этом этапе метод определения оседаний почвы перестает быть объективным, и полученный результат становится зависимым от того, какой результат исполнитель посчитает бракованным. Задача отделения интерферограмм с грубой ошибкой развертки фаз от интерферограмм без нее решается внедрением нестрогого критерия когерентности данных, который определяется на основе визуального анализа, базирующегося на опыте, знании местности работ, и характера ожидаемых оседаний [16].

Развернутые интерферограммы представляют собой карты смещений отметок точек за один период в наклонном направлении [17]. Для создания карт вертикальных смещений вектора оседаний в интерферограммах проецировались на отвесную плоскость, используя орбитальные данные и значения углов зондирования. На основе карт вертикальных смещений были сформированы отдельные файлы в виде табличных данных, состоящих из плановых координат значений оседаний за соответствующий период.

Карты оседаний почвы исходя из своей сути, не имеют привязки к нулевой уровенной плоскости, т.е. не имеют опоры [18]. В пределах квадрата исследований интерферограммы может обеспечиваться субсантиметровая точность определения относительных смещений. Однако из-за погрешности орбитальных данных, (параметров внешнего ориентирования) неточное абсолютное положение сцен

вводит систематическую ошибку в карты смещений. На практике такая ошибка приводит к наклону нулевой плоскости и появлению ложных поднятий. Правильное выставление уровенной плоскости осуществляется подбором постоянных коэффициентов вписанной плоскости по методу наименьших квадратов. Полученная функция плоскости ($Z = AX + BY + C$) служит поправкой для устранения систематической ошибки базиса. Таким образом все карты оседаний привязаны к средней плоскости, делящей оседания и поднятия пополам.

Результаты исследований.

В районе работ на момент производства исследования присутствовали незначительные оседания почвы (локально до 2 мм/год). Интерферограммы строились за короткие периоды (до 50 дней), поэтому влияние измеренных оседаний не должно было превышать 0,5-1 мм для среднего интервала. Пренебрегая фактом незначительных оседаний в пределах 0,5-1 мм утверждается, что на каждой интерферограмме измерялась одна и та же величина околонулевых оседаний. А отклонения от измеренных околонулевых оседаний в таком случае будут интерпретироваться как ошибки случайного и грубого характера.

После устранения наклонов для каждой интерферограммы были определены элементы описательной статистики. Стоит так же отметить, что на начальном этапе исследования с помощью визуального анализа было отобрано 14 интерферограмм с хорошей когерентностью (рис. 1 – выделены темным цветом). Для каждой из 29 интерферограмм была определена средняя квадратическая погрешность (СКП) определения околонулевых смещений по 2:

(2)

где $\bar{x}$ – среднее значение выборки, n – размер выборки.

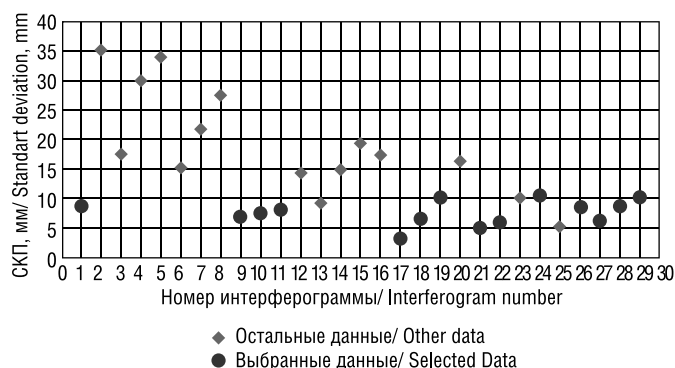
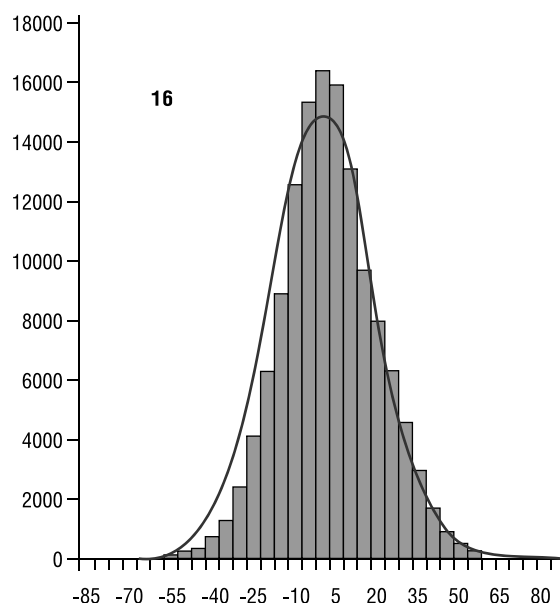
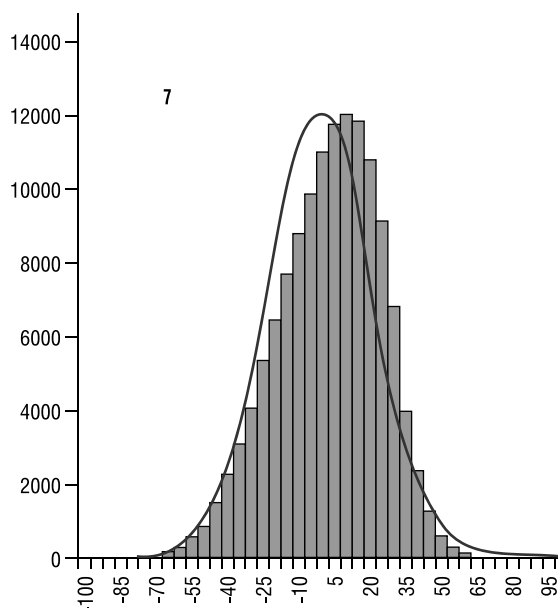
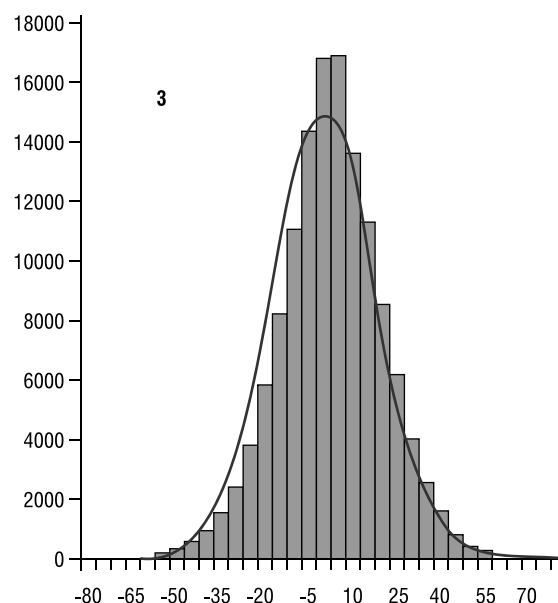


Рис. 1. График среднеквадратических погрешностей карт оседаний /
Fig. 1. Graph of standard deviation of subsidence maps.

Из рис. 1 видно, что значения СКП для выбранных карт оседаний не превышает 10 мм, что в целом оправдывает визуальную выбраковку автора. Однако, исходя из величины СКП рекомендовано добавить в выборку интерферограммы под номерами 13, 23 и 25.

Для каждой карты оседаний, учитывая, что измерялся один и тот же параметр (околонулевых оседаний), была построена гистограмма и была произведена оценка случайной ошибки распределения.



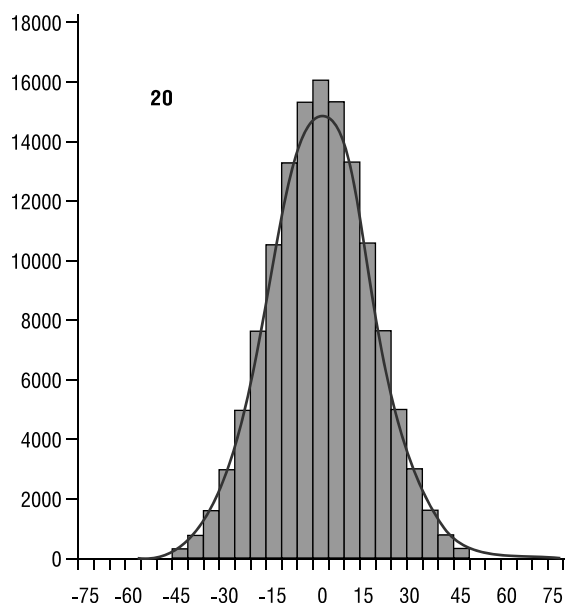


Рис. 2. Примеры гистограмм распределения отклонений вертикальных смещений для некоторых карт оседаний / Fig. 2. Examples of histograms of vertical displacement distributions for some subsidence maps.

Визуально оценивая полученные гистограммы (рис. 2), можно сказать, что в целом данные интерферограмм соответствуют нормальному закону распределения с наличием различного вида асимметрии на некоторых из них. Аналитическая проверка на соответствие нормальному закону распределения была выполнена с помощью критерия Пирсона (χ^2). Заданный критерий выполняется для всех рассматриваемых значений. В результате проверки был сделан вывод о том, что карты смещений подчиняются нормальному закону распределения. Таким образом, можно утверждать о наличии случайных ошибок в исследуемых данных.

Далее было необходимо определить, как изменяется величина СКП при увеличении числа интерферограмм. Все интерферограммы были отсортированы по возрастанию значений СКП. Несмотря на тот факт, что величина случайных ошибок на каждой интерферограмме различна, в зависимости от погодных условий, измерения оседаний на интерферограммах принимаются равноточными, так как используется один и тот же инструмент измерений. Поэтому ошибку наиболее надежного значения измеряемой величины можно определить по формуле

$$M = \frac{m_n}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

где m_n – СКП для n -го числа интерферограмм, n – число интерферограмм.

Для каждого числа n определялась индивидуальная СКП как отношение средней из всех вновь добавленных выборок путем деления на корень из n . То есть, для первой самой точной карты оседаний СКП составило 3,1 мм. К ней добавляется менее точная – вторая интерферограмма, образуя новое значение СКП, которое делится на корень из n . По результатам вычислений был получен график, приведенный на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что при увеличении числа интерферограмм, точность до определенного момента повышается, не-

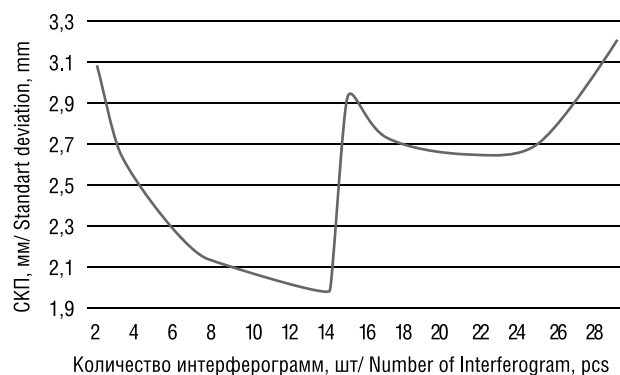


Рис. 3. График изменения средней квадратической погрешности определения оседаний в зависимости от добавления менее точных карт оседаний / Fig. 3. Graph of the change in the standard deviation in determining subsidence, depending on the addition of less accurate subsidence maps.

смотря на включение в измерения менее точных результатов. Но дальше происходит резкий скачок, обусловленный добавлением в анализ интерферограмм с грубыми ошибками. Дальнейшее добавление неточных интерферограмм с грубыми ошибками практически обесценивает многократность измерений, повышая погрешность определения оседаний до уровня однократного измерения. Таким образом, для конкретного рассматриваемого примера максимальную точность (2 мм) можно достичь при использовании 14 интерферограмм с наименьшими индивидуальными значениями СКП отобранными аналитически.

Исходя из полученных результатов, можно прийти к выводу, что слепое добавление избыточного числа интерферограмм при определении средних скоростей оседаний понижает точность определения вертикальных смещений. Основываясь на полученных значениях СКП и интерферограммах, выбранных визуальным способом, можно с некой осторожностью утверждать о целесообразности применения визуального способа при выборе данных. Данный способ на данный момент является наименее трудозатратным, однако, требует наличие опыта.

Оценивая исходные СКП первых 14 интерферограмм, можно сделать вывод, что одна случайная интерферограмма, приведенная к виду карты вертикальных оседаний, имеет точность от 3 до 10 мм без учета грубых ошибок. Среднее значение СКП отдельной карты оседаний составит 7,0 мм (7,0043 мм). Зависимость точности определения вертикальных смещений от количества интерферограмм определяется по (3) и отображена на рис. 4.

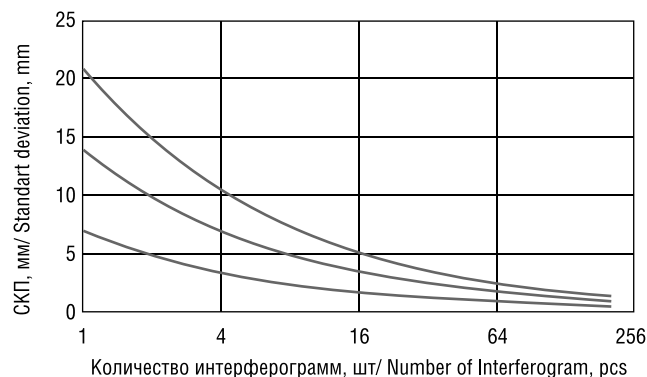


Рис. 4. График уменьшения СКП в зависимости от количества интерферограмм / Fig. 4. Graph of the decrease in the standard deviation depending on the number of interferograms.

В среднем, в отечественной практике, при определении среднегодовых оседаний на месторождениях, за сезон используется 15 сцен, из которых можно получить до 105 интерферограмм. Для 105 интерферограмм предполагаемая точность составляет 0.7, 1.4 и 2.1 мм соответственно для σ , 2σ и 3σ интервалов.

Заключение

1. В данной статье на примере территории Риддерского ГОКа произведен анализ точности определения оседаний методом радарной интерферометрии на основе свободно распространяемых ДДЗ КА Sentinel-1a в пределах заданного квадрата 740×740 пикселей. Установлено, что среднее значение СКП для отдельной интерферограммы составляет 7,0043 мм в условиях хорошей когерентности данных, и независимо от интервала интерферограммы. Визуальная выбраковка интерферограмм с грубыми ошибками хоть и применима, но вносит субъективное влияние на конечный результат. А поэтому требуется более объективная аналитическая оценка.

2. Для достижения наивысшей точности (до 1-2 мм) определения среднегодовых скоростей оседаний необходимо производить не менее 15 циклов съемок в сезон. Также не стоит выпускать из внимания, что предрасчетная точность измерений (1-2 мм) справедлива в том случае, когда измеряется один показатель — среднегодовая скорость оседаний [19]. Зачастую, заказчиком работ по производству радиолокационного мониторинга устанавливается требование оперативного мониторинга [20], для которого, как понятно будет требоваться подбор интервалов интерферограмм, обеспечивающих измерение разных показателей скорости в течение сезона. Из чего становится очевидным, что точность в этом случае будет падать вплоть до априорной точности одной интерферограммы — до 7,0 мм.

3. При оценке точности измерений используя СКП в условиях интенсивных оседаний необходимо вычитать сами значения оседаний, как систематическую погрешность. И анализировать уже оставшиеся значения отклонений. ■

БЛАГОДАРНОСТИ / ACKNOWLEDGMENTS

Авторы работ выражают благодарность работникам маркшейдерского и геомеханического отдела Риддерского ГОКа за возможность производства работы, а также научному руководителю работ на кафедре МДГиГИС Пермского национального исследовательского политехнического университета — проф. Кашникову Ю.А. / The authors are grateful to the surveyor and geomechanical department of Ridder Mining and Processing Division for the opportunity to produce the work, as well as the scientific supervisor of the work at the Department of MDGGIS of Perm National Research Polytechnic University — Prof. Yu.A.Kashnikov.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мозер Д.В., Туякбай А.С., Толеубекова Ж.З. О состоянии подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна по данным космического мониторинга. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых 2017 год, номер 2 Стр.: 170-176.
2. Пономаренко М. Р. Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях крайнего севера с использованием космического радиолокационного зондирования. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. // Санкт-Петербургский горный университет. - 2018г.
3. Ponomarenko M.R., Pimanov I. Yu. Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 574, Springer International Publishing Switzerland. - P. 291-299.
4. Чернов А.В., Исабаев К.Ж., Кидирбаев Б.И., Какимжанов Е.Х. Повышение эффективности мониторинга земной поверхности на территории анненского месторождения с использованием космической радарной интерферометрии (КРИ).// Маркшейдерия и недропользование. - 2019, №2 - стр. 49-50.
5. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В. Многолетний геодинамический мониторинг нефтегазовых месторождений Западной сибирии методом спутниковой радарной интерферометрии // Современные проблем дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012, т.9, № 2 с. 39-41
6. Одабаи-Фард В. В., Пономаренко М.Р. Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - №11. - с. 59-63.
7. Mozer D., Musikhin V., Maas K., Wolf S., McCarty J. L., Levin E., Gey N. and Toleubekova Zh. Comparative Analysis of Software Packages for RADAR Data Interferometric Processing from CIS Country View. Surveying and Land Information Science, Vol. 76, No. 2, 2017, pp. 73-81
8. Соломенников М.Ю., Мусихин В.В., Харина Н.М. Оценка точности определения оседаний, полученных методами радарной интерферометрии по спутниковым снимкам ENVISAT и TerraSAR-X на территории промышленного объекта г.Березники. // Маркшейдерский вестник - 2017 г. - 2. стр. 44-49.
9. Wegmuller U. Walter D., Spreckels V. and Charles L. Werner. Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatter Interferometry [Статья] // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - [s.l.] : IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010. - 2: Vol. 48. - pp. 895-904.
10. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Пермь, 2012 г.
11. Филатов А.В. Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии [Статья] // Вестник Югорского государственного университета. - 2006г.. - 4. - стр. 103-109.
12. Zhang H., Wang C., Tang Y. Subsidence monitoring in coal area using timeseries InSAR combining persistent scatterers and distributed scatterers // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. 39. 49-55.

13. Лысков И.А., Кашников Ю.А., Мусихин В.В. Определение оседаний земной поверхности подработанных территорий при разработке полезных ископаемых по результатам интерферометрической обработки радарных данных. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2012, № 4.
14. Кантемиров Ю.И., Камза А.Т., Бермуханова А.М., Тогайбеков А.Ж., Сапарбекова М.А., Никифоров С.Э. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан. // Журнал Геоматика - 2014г., - 4. - стр. 46-58.
15. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Мониторинг деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи по радарным интерферометрическим изображениям ENVISAT и ERS [Конференция]. - Москва: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. - стр. 179.
16. Carnec, C., C. Delacourt. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France // Journal of Applied Geophysics, 2000. 43(1): p. 43-54.
17. Hanssen R. Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis [Книга]. - New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow : Kluwer Academic Publishers, 2001. - Vol. 2.
18. Кашников Ю.А., Беляев К.В., Богданец Е.С., Согорин А.А. Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа. Монография. - М.: ООО «Издательский дом Недра», 2018. - 454 с. стр.302-318.
19. Буш В., Хебель Х.П., Шаффер М., Вальтер Д., Барях А.А. Контроль оседаний подработанных территорий методами радарной интерферометрии [Статья] // Маркшейдерия и недропользование, 2009г. - 40 - №2. - стр. 38-43.
20. Жантаев Ж.Ш., Курманов Б.К., Иванчукова А.В., Фремд А.Г., Бибосинов А.Ж., Кирсанов А.В., Кантемиров Ю.И. Результаты космического радарного мониторинга смещений и деформации зданий и сооружений в Астане. // Журнал Геоматика - 2013г., - 4, стр.37-53.

REFERENCES

1. Mozer D.V., Tuiakbai A.S., Toleubekova Zh.Z. On the state of the undermined territories of the Karaganda coal basin according to space monitoring data, Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physical and technical problems of mining], 2017, no 2, pp. 170-176.
2. Ponomarenko M.R. Development of a method for deformation monitoring of open pit mining in the conditions of the Far North using space radar sounding, Thesis for the degree of candidate of technical sciences, Sankt-Peterburgskii gornyi universitet [St. Petersburg Mining University], 2018.
3. Ponomarenko M.R., Pimanov I. Yu. Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 574, Springer International Publishing Switzerland. - P. 291-299.
4. Chernov A.V., Isabaev K.Zh., Kidirbaev B.I., Kakimzhanov E.Kh. Povyshenie effektivnosti monitoringa zemnoi poverkhnosti na territorii annenskogo mestorozhdeniia s ispol'zovaniem kosmicheskoi radarnoi interferometrii, Marksheideriia i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsurface use], 2019, no 2, pp. 49-50.
5. Filatov A.V., Evtiushkin A.V., Vasil'ev Iu.V. Long-term geodynamic monitoring of oil and gas fields in Western Siberia using satellite radar interferometry, Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, vol.9, no 2, pp. 39-41
6. Odabai-Fard V. V., Ponomarenko M.R. Geodynamic monitoring of the earth's surface and mining facilities using the method of radar interferometry, Gornyi informatsionno-analicheskii biulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin], 2017, no. 11, pp. 59-63.
7. Mozer D., Musikhin V., Maas K., Wolf S., McCarty J. L., Levin E., Gey N. and Toleubekova Zh. Comparative Analysis of Software Packages for RADAR Data Interferometric Processing from CIS Country View. Surveying and Land Information Science, Vol. 76, No. 2, 2017, pp. 73-81
8. Solomennikov M.Y., Musikhin V.V., Kharina N.M., Estimation of the accuracy of the determination of subsidence obtained by radar interferometry from satellite images of envisat and terrasars-x on the territory of the industrial site of Berezniki, Marksheiderskii vestnik [Mine surveying bulletin], 2017, no. 2, pp. 44-49
9. Wegmuller U. Walter D., Spreckels V. and Charles L. Werner. Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatter Interferometry // Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - [s.l.] : IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010. - 2: Vol. 48. - pp. 895-904.
10. Musikhin V.V. Monitoring of the processes of subsidence of the earth's surface in areas of intensive subsoil use based on interferometric processing of space radar sounding data, Thesis for the degree of candidate of technical sciences, Perm National Research Polytechnic University, 2012.
11. Filatov A.V. Detection of Earth Surface Movements in the Zone of Intensive Oil Production by Radar Interferometry Methods, Vestnik Iugorskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Yugra State University], 2006, no 4, pp. 103-109.
12. Zhang H., Wang C., Tang Y. Subsidence monitoring in coal area using timeseries InSAR combining persistent scatterers and distributed scatterers // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. 39. 49-55.
13. Lyskov I.A., Kashnikov Iu.A., Musikhin V.V. Determination of subsidence of the earth's surface of undermined territories during the development of minerals based on the results of interferometric processing of radar data, Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physical and technical problems of mining], 2012, no. 4.
14. Kantemirov Iu.I., Kamza A.T., Bermukhanova A.M., Togaibekov A.Zh., Saparbekova M.A., Nikiforov S.E. Space radar monitoring of displacements of the earth's surface on the example of one of the oil fields in the Mangistau.
15. Bryksin V.M., Evtiushkin A.V., Filatov A.V. Monitoring of deformations of the earth's surface in areas of intensive oil production using radar interferometric images ENVISAT and ERS [Conference], Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa [Moscow Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2006, p. 179 .

16. Carnec, C., C. Delacourt. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France // Journal of Applied Geophysics, 2000. 43(1): p. 43-54.
17. Hanssen R. Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis [Книга]. - New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2001. - Vol. 2.
18. Kashnikov Iu.A., Beliaev K.V., Bogdanets E.S., Sogorin A.A. Surveying support for the development of oil and gas fields. Monograph, Moscow, Izdatel'skii dom Nedra [Nedra Publishing House], 2018, pp. 302-318.
19. Bush V.A., Hebel H.-P., Schaffe M., Valter D.Yu., Baryakh A.A., Control of underworked areas subsidence using the radar interferometry methods, Marksheideriia i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsurface use], 2009, no 40 (2), pp. 38-43
20. Zhantaev Zh.Sh., Kurmanov B.K., Ivanchukova A.V., Fremd A.G., Bibosinov A.Zh., Kirsanov A.V., Kantemirov Iu.I. Results of space radar monitoring of displacements and deformations of buildings and structures in Astana, Geomatika [Geomatics], 2013, no 4, pp. 37-53.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS



Мусихин Василий Владимирович:
кандидат технических наук, доцент,
ведущий инженер кафедры Маркшейдерского дела,
геодезии и геоинформационных систем, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»,
Пермь, Россия,
e-mail: basil2@list.ru

Musikhin Vasily:
PhD in engineering sciences,
associate professor,
lead engineer,
Department of mine surveying, geodesy and geoinforma-
tion systems,
Perm national research polytechnic university,
Perm, Russia,
e-mail: basil2@list.ru



Тютюкова Виктория Александровна:
ассистент,
инженер кафедры Маркшейдерского дела, геодезии
и геоинформационных систем, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»,
Пермь, Россия,
e-mail: tyutyukova.va@yandex.ru

Tiutiukova Viktoriya:
assistant lecturer,
engineer,
Department of mine surveying, geodesy and geoinforma-
tion systems,
Perm national research polytechnic university,
Perm, Russia,
e-mail: tyutyukova.va@yandex.ru



Харина Нина Михайловна:
старший преподаватель,
инженер кафедры Маркшейдерского дела, геодезии
и геоинформационных систем, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»,
Пермь, Россия,
e-mail: harinanm@list.ru

Kharina Nina:
senior lecturer,
engineer,
Department of mine surveying, geodesy and geoinforma-
tion systems,
Perm national research polytechnic university,
Perm, Russia,
e-mail: harinanm@list.ru

ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.