

УДК 542.86

## МОНИТОРИНГ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЙОНАХ ИНТЕНСИВНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Дудников В.Ю., Власов А.С., Ланина Т.Д.

*ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта,  
e-mail: vdudnikov@ugtu.net, avlasov@ugtu.net, tlanina@ugtu.net*

В работе сделан акцент на возможностях решения практических задач мониторинга земной поверхности, которые предоставляет метод радиолокационной спутниковой интерферометрии. Отмечаются особенности метода, его преимущества и недостатки, проведен анализ отечественного опыта использования метода, а также зарубежного. Приводится пример итогов использования данного метода дистанционного мониторинга подрабатываемой территории уникального Ярегского месторождения высоковязкой нефти, извлекаемой шахтным методом. Проведение съемок критически проанализировано с заключением о соответствии требованиям. Даются рекомендации по увеличению достоверности измерений вертикальных смещений земной поверхности дополнением метода высокоточными подспутниковыми измерениями-наблюдениями за пунктами маркшейдерской опорной и рабочей геодезической сети, а также совместной интерпретацией результатов наземной и спутниковой съемок. Отмечается, что использование в комплексе при наземной съемке лазерных сканирующих систем позволит построить непрерывную карту просадок, которую для северных районов страны видится крайне уместным совмещать с данными по районированию геокриологических процессов. По обзору различных источников сделан вывод о неоднозначном отношении к методу спутниковой радарной интерферометрии в научно-производственной среде маркшейдерского и геодезического сообщества с точки зрения достоверности получаемых результатов, в частности из-за отсутствия в настоящее время четких критериев оценки точности выявленных оседаний. Однако отмечается общая уверенность профильных специалистов в постепенном решении имеющихся сегодня проблем использования метода, а также общее ожидание развития дистанционных методов изучения земной поверхности, в том числе и подповерхностных его методов, использование которых интересно еще и с точки зрения открывающейся возможности исследования состояния почв, которые для районов интенсивной нефтедобычи является крайне актуальной задачей.

**Ключевые слова:** мониторинг земной поверхности, участок шахтной разработки, спутниковая радарная интерферометрия, опорная и деформационная сеть

## MONITORING OF THE EARTH'S SURFACE IN THE AREAS OF INTENSIVE SUBSOIL USE ON THE BASIS OF THE METHOD OF SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY

Dudnikov V.Yu., Vlasov A.S., Lanina T.D.

*Ukhta State Technical University, Ukhta,  
e-mail: vdudnikov@ugtu.net, avlasov@ugtu.net, tlanina@ugtu.net*

The paper focuses on the possibility of solving practical problems of monitoring the earth's surface, which provides the method of radar satellite interferometry. The features of the method, its advantages and disadvantages are noted, the analysis of domestic experience in using the method, as well as foreign experience, is carried out. An example of the results of using this method of remote monitoring of the undermined territory of the unique Yaregskoye field of high-viscosity oil extracted by the shaft method is given. The filming was critically reviewed with a conclusion of compliance with the requirements. Recommendations are given to increase the reliability of measurements of vertical displacements of the earth's surface by supplementing the method with high-precision sub-satellite measurements-observations of the points of the surveying reference and working geodetic network, as well as joint interpretation of the results of ground and satellite surveys. It is noted that the use of laser scanning systems in combination with ground surveys will make it possible to build a continuous map of subsidence, which for the northern regions of the country seems to be extremely appropriate to combine with data on the zoning of geocryological processes. Based on a review of various sources, it was concluded that there is an ambiguous attitude towards the method of satellite radar interferometry in the scientific and industrial environment of the surveying and geodetic community in terms of the reliability of the results obtained, in particular, due to the current lack of clear criteria for assessing the accuracy of the identified subsidence. However, there is a general confidence of specialized specialists in the gradual solution of the current problems of using the method, as well as a general expectation of the development of remote methods for studying the earth's surface, including its subsurface methods, the use of which is also interesting from the point of view of the opening opportunity to study the state of soils, which for areas of intensive oil production is an extremely urgent task.

**Keywords:** monitoring of the earth's surface, mining area, satellite radar interferometry, reference and deformation network

Площадные наблюдения участков земной поверхности на объектах добывающей промышленности [1]. Необходимость выполнения деформационного мониторинга оговаривается законодательством РФ с большим риском возникновения геодинамических явлений относятся к числу наиболее важных вопросов мониторинга

о промышленной безопасности, упомянута она и в Градостроительном кодексе. Широкий спектр возможностей для выявления опасных деформаций земной поверхности территорий месторождений может и предоставляет сегодня дистанционное зондирование, и в этой части нужно отметить распространение метода определения вертикальных смещений, основанного на применении радаров с синтезированной апертурой (РСА).

Целью исследования ставится выявление особенностей метода определения вертикальных смещений с использованием РСА, в том числе по итогам конкретного опыта дистанционного мониторинга подрабатываемой территории уникального Ярегского месторождения высоковязкой нефти, извлекаемой шахтным методом, а также разработка рекомендации по увеличению достоверности измерений вертикальных смещений земной поверхности.

*Анализ опыта использования РСА для мониторинга земной поверхности*

В иностранной литературе много лестных отзывов о методе, однако мало основанных на сходимости результатов, полученных традиционными наземными методами и по спутниковым данным. По анализу же опыта использования метода все же можно сделать вывод о совсем не широком его распространении в России, ограниченном небольшим перечнем проектов. Анализ использования метода в одном из таких проектов представлен далее в статье. Этот метод, предусматривающий извлечение информации о высотах земной поверхности на основе фазовой составляющей отраженного радиолокационного сигнала (рис. 1) и использующий для проведения измерений эффект интерференции электромагнитных волн [2], применялся и для мониторинга подрабатываемой территории уникального Ярегского место-

рождения (крупнейшее месторождение высоковязкой нефти, извлекаемой шахтным методом).

*Проведение дистанционного мониторинга подрабатываемой территории*

Начиная с 2016 года ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» стал практически ежегодно проводить мониторинг земной поверхности участка шахтной разработки на основе метода стабильных отражателей, в качестве которых, в силу застроенности территории месторождения, используются объекты его инфраструктуры (здания, сооружения, а также участки голой земли без растительности), для каждого из них известны смещения на каждую дату съемки. Для участка, подлежащего съемке, были определены:

1) радиолокационный спутник (на выбор спутника влияют многие факторы, такие как площадь наблюдаемого участка местности и необходимая периодичность повторной съемки, а также тип рельефа и растительного покрова. С их учетом оптимальной представлялась съемка со спутника TerraSAR-X или Cosmo-SkyMed, которые зондируют земную поверхность на длине волны X-диапазона – 3,1 см);

2) площадь наблюдаемого участка, которая, в зависимости от выбранного радиолокационного спутника, может составлять от 10×10 км до 200×200 км на один кадр съемки (могут наблюдаться и большие по площади территории за счёт их покрытия несколькими кадрами);

3) периодичность съемки, в зависимости от выбранного носителя и географического расположения рассматриваемого участка, может составлять от 2 до 45 дней;

4) количество радарных повторных измерений в год;

5) применение метода интерферометрического анализа точечных целей;

6) возможное использование угловых отражателей.

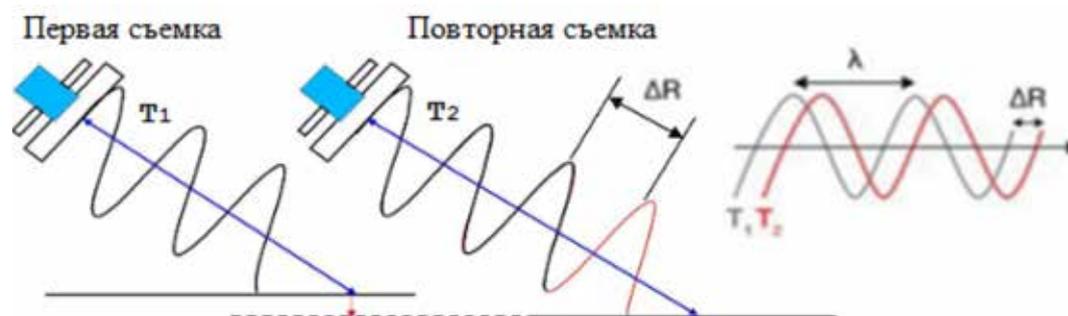


Рис. 1. Спутниковая радиолокационная интерферометрия



Рис. 2. Этапы интерферометрической обработки [3]

Все возможные режимы съемки и комбинации поляризации сигнала, а также большой диапазон углов съемки предлагает радарный спутник TerraSAR-X. В связи с длиной волны 3,1 см необходимы более частые съемки, чтобы поддерживать корреляцию фаз на должном уровне. Кроме того, отметим, что кадр съемки TerraSAR-X – узкий, 30x50 км, что менее удобно, чем квадратные кадры конкурирующих спутниковых систем.

В итоге исходными данными служили снимки именно с данного радарного спутника, удовлетворяющего техническим возможностям (пространственное разрешение и длину волны), обеспечивающего за бес-

снежный период 12 проходов над территорией. Снимки были выполнены в режиме съемки StripMap с пространственным разрешением 3 м. По результатам обработки космической съемки на территории нефтяного предприятия, порядок которой представлен на рисунке 2, строились карты вертикальных смещений земной поверхности по состоянию на несколько дат относительно дат первой съемки.

На снимках, пример которых приведен на рисунке 3, вертикальные смещения представлены в виде точек (постоянных отражателей) и окрашены в градиентные цвета от синего к красному.

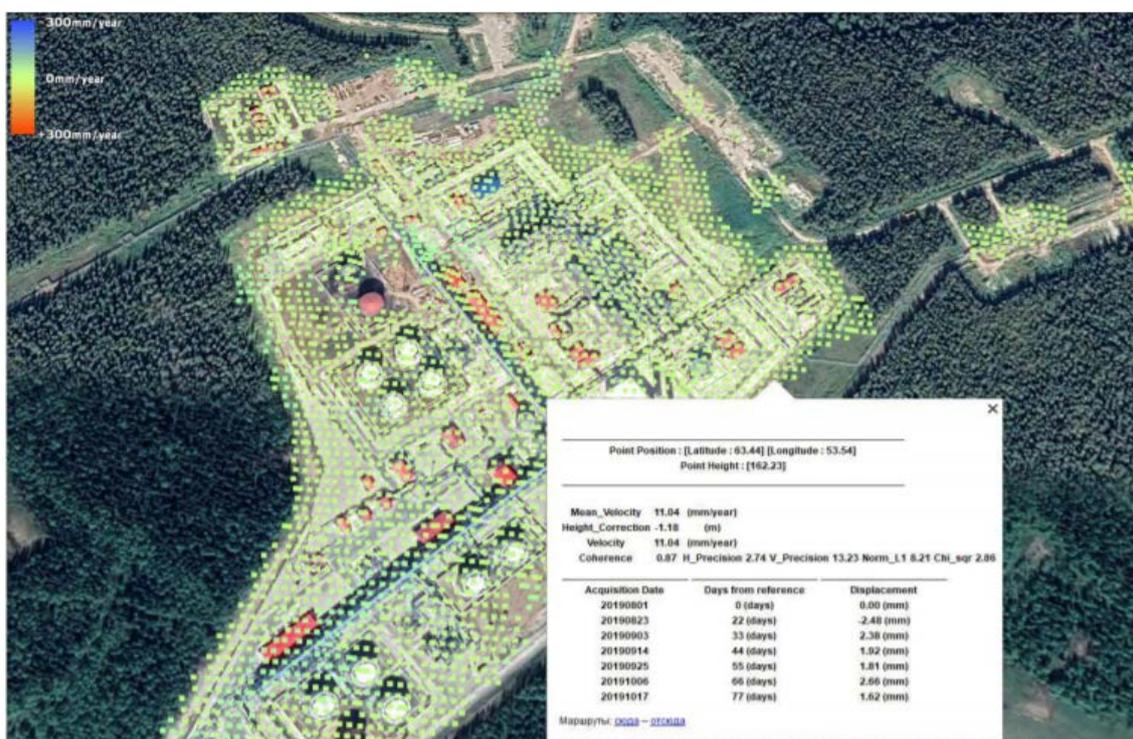


Рис. 3. Мониторинг деформаций подрабатываемой территории Ярегского месторождения (с 01.08.2019 по 17.10.2019 (район ПИЧН и ВПУ))

Зеленый цвет и его оттенки (светло-голубой, желто-зеленый) свидетельствуют о стабильности территории. Желтый и красный цвета отражателей свидетельствуют о поднятиях земной поверхности. Синий цвет характеризует зоны оседаний. Исполнителями на основе анализа картины смещений отмечалось, что 98% выявленных вертикальных смещений территории находятся в пределах  $-10...+10$  мм и не превышают сходимость метода, в связи с чем делался вывод о том, что, например, за период крайней съемки 2019 г. территория горного отвода нефтешахтного производственного предприятия «Яреганефть» стабильна. Обширная – сопоставимая по площади с контуром месторождения – мульда оседаний земной поверхности не обнаружена.

*Заключение по произведенным работам и выводам исполнителей*

В качестве заключения по произведенным работам, и особенно выводам исполнителей, позволим себе отметить, что, например, вывод о полном соответствии съемок техническим заданиям не соответствует действительности хотя бы потому, что в одном из них запрашивалась 30-проходная съемка, произведено же было 12, однако известно, что уменьшение количества проходов дает снижение точности наблюдений за смещениями (десять дополнительных сцен дает уменьшение стандартного отклонения определения оседаний методом радарной интерферометрии примерно на 3 мм). Основные требования к проведению съемок были выдержаны, отметим только незначительную рассинхронность их проведения, хотя для исключения сезонных колебаний земной поверхности рекомендуется проводить повторные наблюдения в одинаковые даты в разные годы начала и конца серии мониторинга. Так, в рассматриваемом мониторинге циклы проведенных работ были произведены, по понятным причинам, в бесснежные периоды: с июля по ноябрь (2016 г.), с мая по сентябрь (2018 г.) и с августа по сентябрь (2019 г.) [4]. Отметим также, что вывод о стабильности территории дается за непродолжительный исследуемый период съемок. Однако известно о специфических особенностях смещений земной поверхности над подземными выработками, в том числе об их неравномерном движении во времени [5]. Кроме того, что в отчетах указано, что сходимость метода определена «...из опыта проводившихся работ на нефтяных и газовых месторождениях», однако уместно упомянуть, что в настоящее вре-

мя нет единой методики обработки данных РСА и критериев оценки точности выявленных оседаний.

Несмотря на этот и прочие примеры использования метода, анализ позволяет согласиться с выводами [4] и заключить, что работы по определению оседаний земной поверхности методом радарной интерферометрической съемки ведутся преимущественно в исследовательских целях. Также нельзя не согласиться с тем, что невысокая популярность метода связана с рядом факторов, в том числе и с часто упоминаемыми в различных источниках: потерей корреляции в областях с густой растительностью; ионосферными и атмосферными помехами; неоднозначностью развертки фазы и возможностью оценки только одной компоненты смещений – проекции на направление на спутник; возможностью проведения анализа вертикальных и горизонтальных смещений только при наличии данных с разных орбит; неподходящей для мониторинга периодичностью съемки радарными спутниками [4]. Не менее важным является то, что до сих пор требования к радиолокационным данным, единая методика производства обработки данных радиолокационного зондирования и, главное, критерии оценки точности выявленных оседаний остаются непроработанными вопросами.

В связи с чем нам пока видится применение космической радиолокации в качестве дополнения к классическим методам мониторинга, когда требуется также проведение подспутниковых наземных измерений как минимум для контроля и верификации результатов. Нужно отметить, что отношение к методу с точки зрения достоверности полученных результатов остается неоднозначным в геодезических сообществах.

В использованном на Яреге методе рассеивателей видится крайне уместной дополнительной установка и наблюдение искусственных уголкового отражателей (вероятно, над пунктами опорной геодезической сети), за которыми однозначно не будет лишним следить традиционными геодезическими методами. Все же при заявляемых определенных миллиметровых осадках не прибавляет доверия использование при съемке территории шахтной разработки в качестве устойчивых отражателей (постоянные рассеиватели радарного сигнала) объектов инфраструктуры месторождения, а не пунктов планово-высотного обоснования (геосети) – пространственно-координатной основы для принятия оптимальных управ-

ленческих решений. Однозначно, повысить доверие к результатам съемки позволило бы дополнение метода высокоточными подспутниковыми измерениями-наблюдениями за пунктами маркшейдерской опорной и рабочей (деформационной) геосети, а также совместная интерпретация результатов наземной и спутниковой съемки. Так, использование в комплексе при наземной съемке лазерных сканирующих систем позволило бы построить непрерывную карту просадок (традиционными геодезическими методами ее не построить), которую для северных районов страны видится крайне уместной совмещать с данными по районированию геокриологических процессов. Кроме того, на проблемных участках для целей подповерхностного зондирования горно-геологических сред на большие глубины (до 300 метров) видится целесообразным периодически проводить георадарные определения. В части разговора об использовании пунктов опорной сети не лишним будет упоминание о необходимости проведения оценки влияния экзогенных факторов на устойчивость их конструкций и его последующий учет. Такой подход при постановке повторных геодезических наблюдений на объектах инфраструктуры учтен, например, в работе Е.Н. Грищенко [6], данные же для учета представлены на рисунке 4.

Как известно, вне зоны деформаций, помимо рабочих пунктов, закрепляются не менее трех опорных точек, и из числа пунктов маркшейдерской опорной геодезической сети выбираются исходные репера. Отметим, что вынос исходного знака за пре-

делы горного отвода не всегда гарантирует его стабильности в пространстве и времени, поскольку на него воздействуют повсеместно распространенные эндогенные и экзогенные геомеханические процессы [7], в силу чего видится возможным предлагать использование в качестве исходного геодезического пункта скважины или элементов их площадок.

Подводя итог описанному, следует отметить, что выбор в пользу того или иного оборудования для проведения наблюдений может быть сделан лишь на основании анализа погрешностей измерений, возникающих при использовании различного, в том числе геодезического, инструментария в процессе мониторинга деформаций. А в части перспектив использования метода радарной интерферометрии видится очевидным, что с развитием новых методов обработки и анализа данных, по мере разработки новой аппаратуры, с запуском новых спутников, отмеченные общие проблемы метода РСА постепенно устранятся, и он, как и прочие дистанционные методы изучения земной поверхности, приобретет и большую надежность, и доверие профильных специалистов, сообщество которых находится в ожидании развития дистанционных методов изучения земной поверхности, в том числе и подповерхностных его методов, использование которых интересно еще и с точки зрения открывающейся возможности исследования состояния почв, что для районов интенсивной нефтедобычи является крайне актуальной задачей.

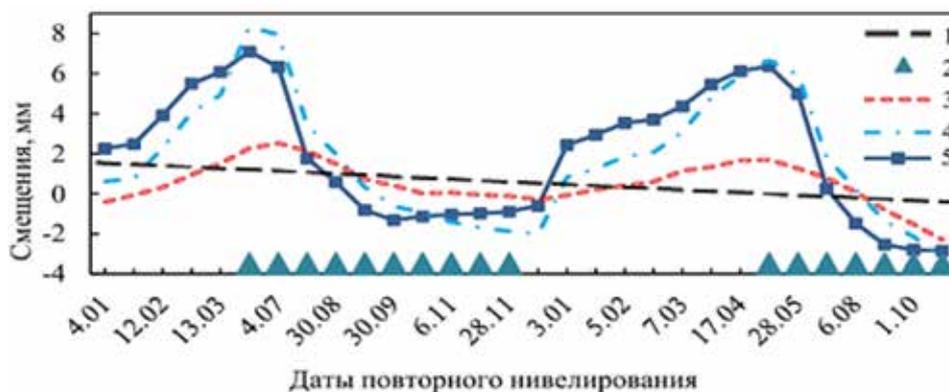


Рис. 4. График смещений грунтового нивелирного пункта (сезонных вертикальных) [3]  
 1 — линия тренда оседания земной поверхности; 2 — период вегетации древесных насаждений  
 смещения с учетом поправок за изменение температуры; 3 — смещения с учетом поправок  
 за изменение температуры и за набухание грунта; 4 — смещения с учетом поправок  
 за изменение температуры; 5 — измеренные смещения

**Список литературы / Reference**

1. Одабай-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. 59-67.  
 Odabai-Fard V.V., Ponomarenko M.R. Geodynamic monitoring of the earth's surface and mining facilities using the method of radar interferometry // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. № 11. P. 59-67 (in Russian).
2. Пономаренко М.Р. Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях Крайнего Севера с использованием космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 155 с.  
 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: dis. ... kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2018. 155 p. (in Russian).
3. Филатов А.В. Метод обработки комплексных радиолокационных интерферограмм в условиях высокой временной декорреляции: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 2009. 28 с.  
 Filatov A.V. Method for processing complex radar interferograms under conditions of high temporal decorrelation: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Barnaul, 2009. 28 p. (in Russian).
4. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2012. 146 с.  
 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: dis. ... kand. tekhn. nauk. Perm', 2012. 146 p. (in Russian).
5. Дмитриев П.Н. Новые методы обработки и интерпретации данных радарной спутниковой интерферометрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2013. 124 с.  
 Dmitriev P.N. New methods of processing and interpretation of radar satellite interferometry data: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Moskva, 2013. 124 p. (in Russian).
6. Грищенко Е.Н. Геодезический мониторинг динамики развития деформационного процесса земной поверхности на подрабатываемых территориях: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 135 с.  
 Grischenkova E.N. Geodetic monitoring of the dynamics of the development of the deformation process of the earth's surface in undermined territories dis. ... kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2018. 135 p. (in Russian).
7. Вершинина Ю.В. Геодезическое обеспечение мониторинговых наблюдений за деформационными процессами на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2016. 22 с.  
 Vershinina Yu. V. Geodetic support for monitoring observations of deformation processes at geodynamic polygons of oil and gas fields avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2016. 22 p. (in Russian).