

Наблюдение динамики топливных резервуаров Норильской ТЭЦ-3 по данным PCA Sentinel-1

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, .
E-mail: aizakhar@ire.rssi.ru*

Приведены результаты интерферометрической обработки и анализа снимков европейских спутниковых радаров с синтезированной апертурой Sentinel-1 по территории Норильской ТЭЦ-3. Сформированные интерферограммы охватывают холодные интервалы времени осени-зимы 2019-2020 г. и весенне-летние интервалы 2020 г., в том числе и событие разгерметизации резервуара с дизельным топливом. Благодаря высокой временной стабильности отражений радарных сигналов поверхностью промышленной площадки ТЭЦ 3 за время между повторяющимися съемками оказалось возможным выполнить мониторинг состояния топливных резервуаров и прилегающей к ним территории методом классической интерферометрии. Обнаружено, что на всех интервалах наблюдений взаимное положение всех четырех резервуаров ТЭЦ и прилегающей к ним территории стабильно в диапазоне 2-3 мм. Можно предположить, что разгерметизация резервуара не была вызвана смещением отражающей поверхности исследуемой территории вследствие таяния вечной мерзлоты. Ключевые слова: Норильск, резервуар, радиолокационная интерферометрия, Sentinel 1, динамика поверхности

Monitoring of Norilsk TPP-3 fuel tanks dynamics using Sentinel-1 SAR data

A.I. Zakharov, L.N. Zakharova

V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch

The results of interferometric processing and analysis of European spaceborne synthetic aperture radars Sentinel-1 acquired over the territory of Norilsk TPP-3 are presented. Radar interferograms created cover both cold season of 2019-2020 and warm season of 2020 including catastrophic event - the rupture of the tank with diesel fuel. Owing to high temporal stability of radar signals backscatter from the surface of TPP-3 territory on the time interval between repeated observations the monitoring of the stability of fuel tanks and adjacent territory using classical radar interferometry technique was conducted. It was discovered that the relative location of all four TPP-3 reservoirs and adjacent territory is stable within the 2-3 mm band on all the observation intervals. We may suppose that fuel tank rupture was not caused by the dynamics of the study area as a consequence of permafrost thaw. Keywords: Norilsk, tank, radar interferometry, Sentinel 1, surface dynamics

По масштабам воздействия на окружающую среду разлив нефтепродуктов 29 мая 2020 г. на топливохранилище ТЭЦ-3 города Норильска стал экологической катастрофой федерального масштаба. В результате разгерметизации одного из 4 резервуаров топливохранилища произошла утечка 21 тысячи тонн дизельного топлива. Одной из главных версий причины аварии — таяние мерзлого грунта из-за аномально теплой погоды, что могло вызвать повреждения опор, на которых стояла платформа с резервуаром. Сплошная многолетняя мерзлота характерна для данного региона. Наиболее типичны тундровые глеевые почвы, встречаются также болотные и аллювиальные почвы [1]. ТЭЦ-3 находится на краю плато Надежда и примыкает к металлургическому заводу имени Б. И. Колесникова с юго-запада, составляя с ним единую промышленную зону.

Целью данной работы является демонстрация возможностей космической радиолокационной интерферометрии для выявления просадок отражающей поверхности участков промышленной зоны в районе резервуара и/или горизонтальных смещений его стенок. Радиолокационная интерферометрия в схеме съемки земных покровов с повторяющихся орбит носителя как средство выявления мелкомасштабных смещений поверхности за время между съемками проявила себя во многих приложениях методов дистанционного зондирования Земли. Краткими примерами, близкими по тематике данному исследованию, могут быть работы по наблюдению циклических смещений торфяных почв в дельте реки Селенги вследствие морозного пучения зимой и просадок из-за высыхания летом [2]. Другие примеры — наблюдение сантиметровых подвижек поверхности оползневого склона на берегу реки Бурей [3], температурные деформации пролетов железнодорожных мостов [4]. Технология радиолокационной интерферометрии, предполагает проведение съемок с близких орбит носителя съемочной радиолокационной аппаратуры. Спутниковые радары с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 Европейского космического агентства, выполняющие съемку с повторяющихся орбит с интервалом 12 дней, являются одним из наиболее подходящих источников данных для целей данной работы. Анализ содержимого архивов снимков Sentinel-1 в архиве Copernicus (см. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) показал, что до начала июня 2020 г. территория ТЭЦ-3 снималась только со спутника Sentinel-1B на нисходящей части витка справа по ходу движения с углом обзора 41° к местной вертикали. В июне дополнительно было выполнено несколько съемок со спутника Sentinel 1A в той же геометрии съемки. Орбита этого спутника такова, что можно его данные комбинировать с данными Sentinel-1B и составлять интерферометрические пары с интервалом 6 дней. На снимке Google Earth на рис. 1 желтой стрелкой показано направления полета спутника, голубой стрелкой показано направление радарной съемки. Вследствие наблюдения резервуара примерно с восточного направления западные стенки резервуаров и небольшая прилегающая к ним часть промплощадки оказываются в радиотени. Соответственно, сторона аварийного резервуара, где была утечка топлива (белая стрелка на рис. 1), не видна.



Рис. 1. Снимок территории ТЭЦ-3 и геометрия съемки РСА Sentinel-1 на нисходящем витке

Топливные резервуары на рисунке 1 – сооружения цилиндрической формы диаметром 40 м с конусообразными крышами, расположенные на расстоянии 70 м друг от друга. Уклон крыш резервуаров не превышает 20°. Радиолокационные изображения таких объектов с гладкими в масштабе длины волны поверхностями отличаются от привычных оптических изображений. Доминирующий механизм взаимодействия радиоволны со стенкой резервуара – зеркальное отражение. Вследствие этого отраженный крышей сигнал РСА не возвращается к радару. Подтверждением зеркального отражения сигнала крышей в сторону от радара является тот факт, что после деформации крыши 29 мая радарная сигнатура аварийного резервуара не изменилась. Боковая стенка резервуара образует с поверхностью промплощадки двугранный угол, благодаря чему в результате двойного переотражения сигнал возвращается к радару (см. рис.2).

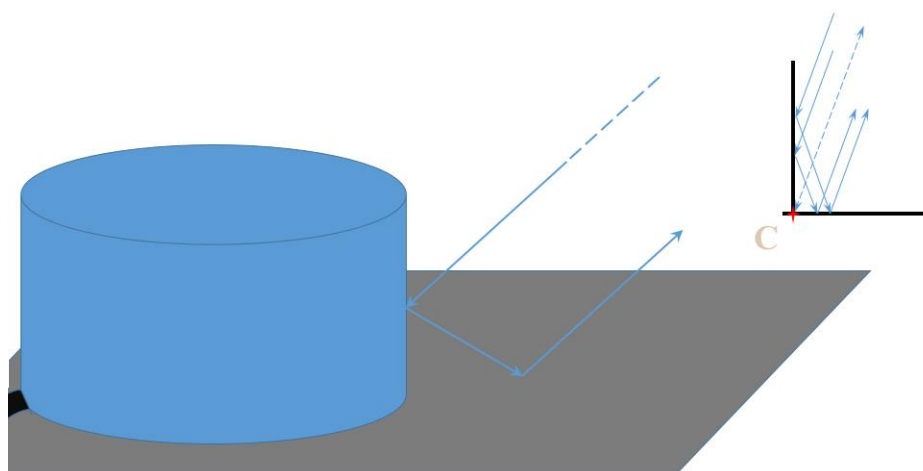


Рис. 2. Взаимодействие радиоволны с конструкцией резервуара

Особенностью отражения сигнала элементами конструкции уголка является равенство длины пути для всех лучей, падающих на грани, вследствие чего резервуар высотой почти 20 м выглядит на изображении с разрешением 2.3 м по дальности яркой точечной целью, расположенной в вершине уголка, в точке С (см. фрагмент рисунка в правом верхнем углу). Мелкомасштабные смещения граней уголка (вертикальной – по горизонтали, а горизонтальной по вертикали) приводят к смещению положения вершины С и, соответственно, изменению расстояния до радара.

Представление о наличии или отсутствии динамики подстилающей поверхности на территории ТЭЦ-3 в период 10 мая – 03 июня 2020 г. (интервал 24 дня), включающий момент аварии, может быть получено с помощью интерферограммы на рис. 3 слева вверху. Полутонами здесь переданы вариации интерферометрической разности фаз от 0 до 2π , которым соответствуют радиальные смещения поверхности в диапазоне 3 см. Ниже приведено соответствующее интерферограмме амплитудное изображение, на котором зеленым кружком обведены эхо-сигналы 4 резервуаров. Положение профиля разности фаз, проходящего через все 4 резервуара с северо-запада на юго-восток, отмечено на интерферограмме красным цветом. В правой части рисунка вверху находится интерферограмма для 6-дневного интервала между съемками (03-09 июня 2020 г.) и соответствующее ей амплитудное изображение. Отмеченные зелеными кружками участки включают места расположения резервуаров; красной линией отмечено положение профилей для оценки возможных подвижек, приведенных на рис. 4.

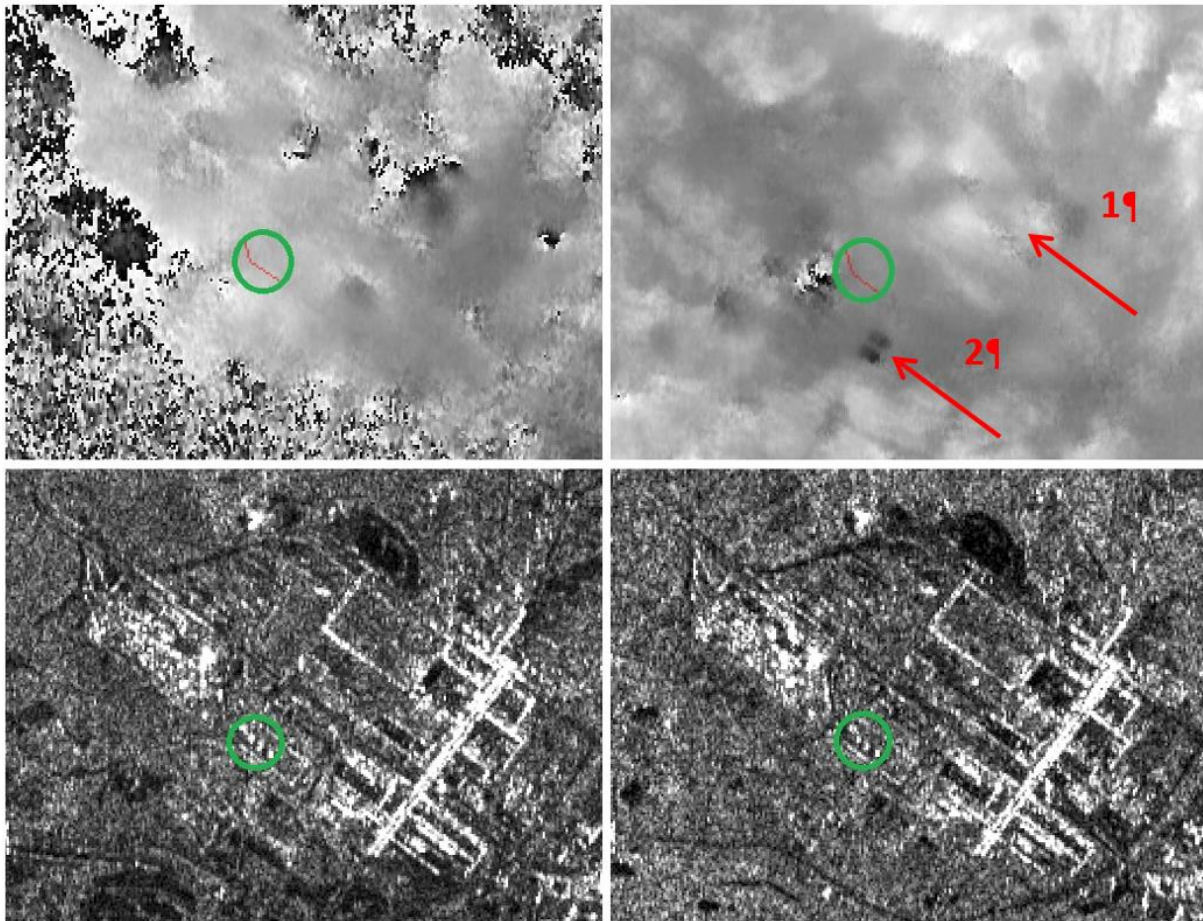


Рис. 3. Фрагменты интерферограмм (вверху) и изображений Sentinel-1 (внизу) для интерферометрических пар 5 мая – 3 июня 2020 г. (слева) и 3–9 июня 2020 г. (справа)

Для исследования влияния иных эффектов, например, морозного пучения зимой на положение резервуаров, в дополнение к таянию вечной мерзлоты в теплое время года, были также проанализированы интерферограммы, приходящиеся на осенне-зимний период 2019-2020 гг. Измеренные профили разности фаз были пересчитаны в радиальные смещения отражающей поверхности, и полученные профили подвижек поверхности представлены в виде 5 графиков на рис. 4. Отрезки в нижней части графика указывают положение резервуаров. Красным цветом маркирован повреждённый резервуар. На графиках рис. 4 видно, что относительно начала профиля, где в качестве реперной точки взято положение первого, предположительно, стабильного резервуара, все флуктуации положения остальных резервуаров, включая повреждённый, находятся в пределах 2-3 мм на всех интервалах наблюдения. Следовательно, морозное пучение зимой 2019-2020 гг. и таяние почв в мае 2020 г. не привели к сколь-нибудь заметным смещениям восточных стенок резервуаров и прилегающей к ним поверхности промплощадки.

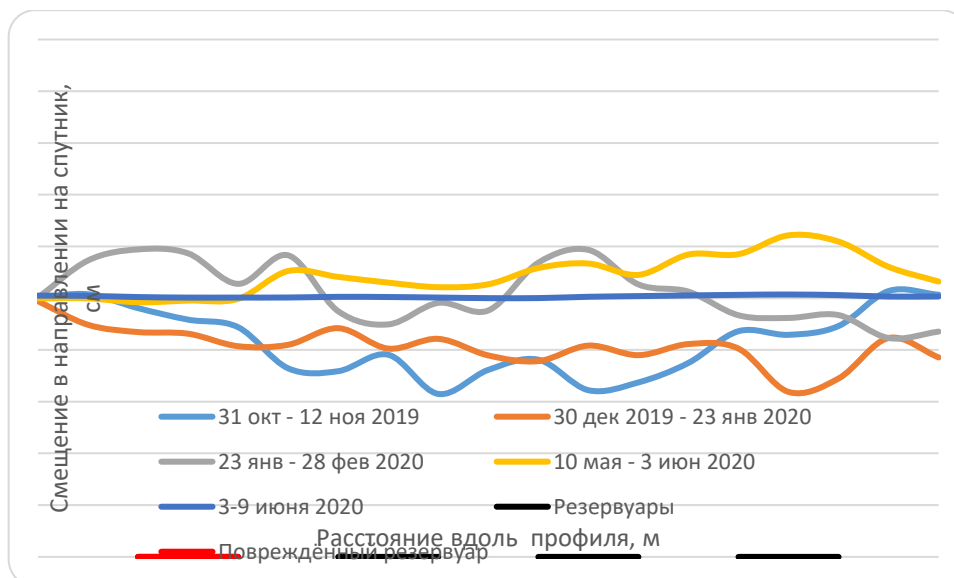


Рис. 4. Профили измеренных подвижек, проходящие через резервуары ТЭЦ-3

Прокомментируем некоторые другие детали, видимые на интерферограммах. Доминирующий механизм рассеяния сигнала поверхностью промзоны и окрестностей – однократное рассеяние. Окружающая промплощадку кустарниковая тундра демонстрирует не очень высокую временную стабильность отражений на 24-дневном интервале между съемками, а потому на левой интерферограмме рис. 3 в нижнем левом и частично в верхнем правом верхнем углу разность фаз сильно зашумлена. На интерферограмме справа с 6-дневным интервалом когерентность отражений заметно выше, и в соответствующих углах интерферограммы можно наблюдать светлые пятна — следствие просадок высыхающих тундровых глеево-торфяных почв на 5 мм за 6 дней. Стрелкой 1 на этой интерферограмме отмечено положение просадок поверхности на месте складов элементарной серы, шлакоотвала и засыпанного озера Туманное. Стрелка 2 указывает на положение брызгальных бассейнов, в которых отраженный сигнал водной поверхности возвращается к радару благодаря двойному переотражению от воды и вертикальных трубок, разбрызгивающих воду. Здесь подъем уровня воды на 7 мм за 6 дней привел к уменьшению разности фаз / потемнению на интерферограмме. Основная часть территории промплощадки демонстрирует высокую стабильность почти на всех сформированных в работе интерферограммах, в отличие от окрестной тундры.

Выводы

Полученные результаты говорят о том, что взаимное положение всех четырех резервуаров ТЭЦ (их восточных стенок) и прилегающей к ним территории стабильно в диапазоне 2-3 мм, в том числе на интервале времени, охватывающем аварийное событие. Можно предположить, что разгерметизация резервуара не была вызвана смещением отражающих поверхностей и конструкций на территории ТЭЦ-3, по крайней мере, с осени 2019 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. Васильевская В. Д. Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: «Наука», 1980. 236 с.

2. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Добрынин С.И., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н. Радиолокационная интерферометрия сезонных деформаций почвы и фазовая модель обратного рассеяния микроволн двухслойной средой с шероховатыми границами// Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 585-591
3. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Буря по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273-277.
4. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Обнаружение динамики мостов методом радиолокационной интерферометрии// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15. №2. С. 42-51. 2018