

Мониторинг стабильности топливных резервуаров Норильской ТЭЦ-3 методами радарной интерферометрии

А. И. Захаров¹, Л. Н. Захарова¹, Л. М. Митник²

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

² *Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия
E-mail: mitnik@poi.dvo.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 гг. 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 съёмками оказалось возможным выполнить мониторинг состояния топливных резервуаров и прилегающей к ним территории методом классической интерферометрии. Обнаружено, что на всех интервалах наблюдений взаимное положение всех четырёх 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

Одобрена к печати: 01.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-281-285

По масштабам воздействия на окружающую среду разлив нефтепродуктов 29 мая 2020 г. на топливохранилище ТЭЦ-3 Норильско-Таймырской энергетической компании города Норильска, дочерней компании «Норникеля», стал экологической катастрофой федерального масштаба. В результате разгерметизации одного из четырёх резервуаров топливохранилища произошла утечка 21 тыс. т дизельного топлива. По данным Росприроднадзора, 6 тыс. т просочились в грунт, остальная часть попала в воду рек Далдыкан, Амбарной и их притоков. Экстренные службы позднее отметили, что предельно допустимые концентрации загрязнителей в реках, куда попало дизельное топливо после аварии, превышены в десятки тысяч раз от нормы. Чтобы заснять разлив топлива в Норильске, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий попросило задействовать зарубежные спутники дистанционного зондирования, о чём сообщили в госкорпорации «Роскосмос». 4 июня была активирована Международная Хартия в целях мониторинга разлива топлива в Норильске (<https://cgt.disasterscharter.org/en/655>). Специалисты Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и Института географии Российской академии наук (ИГ РАН) вели слежение из космоса за районом аварии и анализ спутниковых данных о наблюдаемых здесь загрязнениях (Трошко и др., 2020).

По данным «Норникеля», одной из возможных причин разгерметизации могло быть таяние мёрзлого грунта из-за аномально тёплой погоды. В Генпрокуратуре России заявили, что разгерметизация резервуара с дизельным топливом на ТЭЦ-3 в Норильске произошла из-за просадки грунта, о чём сообщило информационное агентство ТАСС. Высказывалось предположение, что таяние грунта могло оказаться причиной повреждения опор, на которых стояла платформа с резервуаром. Однако расположение ТЭЦ-3 на скальном основании вызывает сомнения в этой гипотезе.

Климат региона — субарктический, резко-континентальный. Повсеместно распространена многолетняя мерзлота. Наиболее типичны тундровые глеевые почвы, встречаются также болотные и аллювиальные почвы (Васильевская, 1980). 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 настоящей работы стала проверка 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 съёмки земных покровов с повторяющихся орбит носителя как средство выявления мелкомасштабных смещений поверхности за время между съёмками 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 р. Селенги вследствие морозного пучения зимой и просадок из-за высыхания летом (Дагуров и др., 2016). Другой пример — наблюдение сантиметровых подвижек поверхности оползня на р. Буре (Захарова, Захаров, 2019). Существенной особенностью изображений, используемых в технологии радиолокационной интерферометрии, оказывается проведение съёмки с близких орбит носителя радиолокационной аппаратуры. В результате анализа содержимого архивов общедоступных радиолокационных снимков обнаружено, что единственным приемлемым источником данных для целей этой работы становится архив Copernicus со съёмками спутниковых радаров с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 Европейского космического агентства (англ. European Space Agency — ESA), выполнявшихся с интервалом 12 дней (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). До начала июня 2020 г. территория ТЭЦ-3 снималась только со спутника Sentinel-1B на нисходящей части витка справа по ходу движения под углом 41° к местной вертикали. В июне дополнительно было выполнено несколько съёмок со спутника Sentinel-1A, орбита которого такова, что можно данные этого спутника комбинировать с данными Sentinel-1B и составлять интерферометрические пары с интервалом 6 дней. На снимке сервиса Google Планета Земля (англ. Google Earth), приведённом на *рис. 1*, стрелкой 1 показано направление радарной съёмки. 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 (стрелка 2 на *рис. 1*), не видна.

Представление о наличии или отсутствии динамики подстилающей поверхности на территории ТЭЦ-3 в период 10 мая — 3 июня 2020 г. (интервал 24 дня), включающий момент аварии, может быть получено с помощью интерферограммы на *рис. 2* слева вверху (см. с. 283). 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 зелёным кружком обведены эхо-сигналы четырёх резервуаров. Положение профиля разности фаз, проходящего через все четыре резервуара с северо-запада на юго-восток, отмечено на интерферограмме красным цветом. В правой части рисунка вверху находится интерферограмма с 6-дневным интервалом между съёмками 3—9 июня 2020 г. и соответствующее ей амплитудное изображение.

Рис. 1. Направление съёмки территории ТЭЦ-3 радарными спутниками Sentinel-1 на нисходящем витке



Рис. 2. 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)

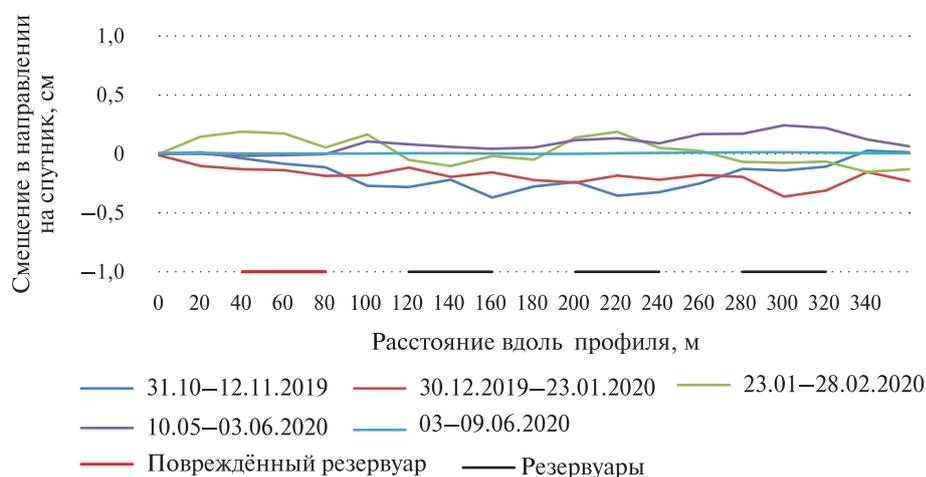


Рис. 3. Профили измеренных подвижек, проходящие через резервуары ТЭЦ-3

Для исследования влияния на положение резервуаров иных эффектов, например морозного пучения зимой в дополнение к таянию вечной мерзлоты в тёплое время года, были также проанализированы интерферограммы, приходящиеся на осенне-зимний период 2019–2020 гг. Измеренные на интерферограммах профили разности фаз были пересчитаны в радиальные смещения отражающей поверхности, и полученные профили подвижек поверхности представлены в виде пяти графиков на рис. 3. Отрезки в нижней части графика указывают положение резервуаров. Красным цветом маркирован повреждённый резервуар. Необходимо подчеркнуть, что в данном случае при зондировании резервуара как цилиндрической конструкции на гладкой поверхности доминирующим представляется отражение по типу двугранного уголкового отражателя, а именно «стенка резервуара–земля–отражение к радару». Просадки почвы, равно как и смещения стенок резервуара в горизонтальном направлении, приведут к изменению длины пути сигнала и будут интерпретированы как динамика отражающей поверхности. На графиках рис. 3 видно, что относительно начала профиля в качестве реперной точки все флуктуации положения 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.

Для пояснения возможностей метода радарной интерферометрии прокомментируем некоторые другие детали, видимые на интерферограммах. Окружающая промплощадку кустарниковая тундра демонстрирует не очень высокую временную стабильность отражений на 24-дневном интервале между съёмками, а потому на левой интерферограмме *рис. 2* в нижнем левом и частично в верхнем правом 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 оз. Туманное. Стрелка 2 указывает на положение брызгальных бассейнов, где повышение уровня воды на 7 мм за 6 дней привело 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.

Полученные результаты свидетельствуют, что взаимное положение всех четырёх резервуаров ТЭЦ 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. *Трошко К. А., Денисов П. В., Лаврова О. Ю., Луян Е. А., Медведев А. Ф.* Наблюдение загрязнений реки Амбарной, возникших в результате аварии на ТЭЦ-3 города Норильска 29 мая 2020 г. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 3. С. 267–274.

Monitoring of the Norilsk TPP-3 fuel tanks stability by means of radar interferometry technique

A. I. Zakharov¹, L. N. Zakharova¹, L. M. Mitnik²

¹ *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Russia
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

² *V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*

The results of interferometric processing and analysis of Sentinel-1 European spaceborne synthetic aperture radar images 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 a catastrophic event — the rupture of the tank with diesel fuel. Owing to high temporal stability of radar signals back-

scatter from the surface of TPP-3 territory on the time interval between repeated observations, a 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 was stable within the 2–3 mm band on all the observation intervals. We may therefore suppose that the fuel tank rupture was not caused by the dynamics of the study area in consequence of permafrost thaw.

Keywords: Norilsk, tank, radar interferometry, Sentinel-1, surface dynamics

Accepted: 01.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-281-285

References

1. Vasilevskaya V. D., *Pochvoobrazovanie v tundrakh Srednei Sibiri* (Soil formation in the tundra of Central Siberia), Moscow: Nauka, 1980, 236 p.
2. Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Dobrynin S. I., Zakharov A. I., Chimitdorzhiev T. N., Radiolokatsionnaya interferometriya sezonnykh deformatsii pochvy i fazovaya model' obratnogo rasseyaniya mikrovoln dvukhsloinoi sredoi s sherokhovatymi granitsami (Radar interferometry of the soil's seasonal deformations and the phase model of backscattering of microwaves by a two-layer medium with rough boundaries), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 7, pp. 585–591.
3. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Nablyudenie dinamiki zony opolznya na reke Bureya po dannym interferometricheskoi s"emki Sentinel-1 v 2017–2018 gg. (Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya River by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 273–277.
4. Troshko K. A., Denisov P. V., Lavrova O. Yu., Loupian E. A., Medvedev A. F., Nablyudenie zagryaznenii reki Ambarnoi, vznikshikh v rezul'tate avarii na TETs-3 goroda Noril'ska 29 maya 2020 g. (Observation of the Ambarnaya River pollution resulting from the accident at the Norilsk Thermal Power Plant No. 3 on May 29, 2020), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 267–274.