

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### О ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НОРИЛЬСКОЙ ТЭЦ-3 ПО ДАННЫМ РСА SENTINEL-1

© 2022 г. А. И. Захаров<sup>а</sup>, \*, Л. Н. Захарова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

\*E-mail: aizakhar@ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.10.2021 г.

Приведены результаты интерферометрической обработки и анализа снимков европейских спутниковых радаров с синтезированной апертурой Sentinel-1 по территории Норильской ТЭЦ-3, полученных в период с июля 2017 по август 2020 г. Сформированные 12-дневные дифференциальные интерферограммы позволили оценить стабильность положения всех четырех топливных резервуаров ТЭЦ относительно заведомо стабильных объектов. Отмечено сильное искажающее влияние атмосферных осадков, а также процессов таяния-замерзания снежных покровов на территории ТЭЦ на качество интерферометрических измерений фаз отраженных топливными резервуарами сигналов. Обнаружено, что на всех 12-дневных интервалах наблюдения в теплое время года в период с июля 2019 по август 2020 г. взаимное положение всех четырех резервуаров и прилегающей к ним территории стабильно с точностью до 1.3 мм. Наблюдения долговременной стабильности резервуаров в период с июля 2017 по август 2020 г. по летним интерферограммам с годичным интервалом между съемками дают оценку стабильности их положения величиной в 4 мм. Можно заключить, что повреждение резервуара не было вызвано площадными смещениями отражающей поверхности исследуемой территории, как это происходит, например, вследствие таяния вечной мерзлоты в районе резервуаров.

**Ключевые слова:** Норильск, топливный резервуар, радиолокационная интерферометрия, Sentinel-1, уголкового отражатель, динамика поверхности

**DOI:** 10.31857/S0205961422040078

#### ВВЕДЕНИЕ

Разлив нефтепродуктов 29 мая 2020 г. на топливохранилище ТЭЦ-3 города Норильска по степени воздействия на окружающую среду стал экологической катастрофой федерального масштаба. В результате разгерметизации одного из резервуаров топливохранилища произошла утечка 21 тыс. т дизельного топлива. Одной из главных версий причины аварии, озвученных руководством горно-металлургической компании “Норникель”, явилось таяние мерзлого грунта из-за аномально теплой погоды, что могло вызвать повреждение опор, на которых стояла платформа с резервуаром.

Для наблюдения за районами чрезвычайных ситуаций, а также ретроспективного мониторинга с использованием архивных данных эффективным является применение космических методов (Бондур, 2010) в совокупности с методами обработки аэрокосмических изображений (Бондур, Старченков, 2001). Задачи дистанционного измерения смещений поверхности разной природы могут успешно решаться с помощью метода дифференциальной интерферометрии (Bamler, Hartl,

1998), (Захарова, Захаров, 2019). Радиолокационная интерферометрия в схеме съемки земных покровов с повторяющихся орбит носителя как средство выявления мелкомасштабных смещений поверхности за время между съемками применяется во многих приложениях методов дистанционного зондирования Земли. В качестве примеров, близких по тематике и методам обработки к данному исследованию, можно назвать работы по наблюдению циклических смещений торфяных почв в дельте реки Селенги вследствие морозного пучения зимой и просадок из-за высыхания летом (Дагуров и др., 2016), наблюдение сантиметровых подвижек поверхности оползневого склона на берегу реки Бурей (Захарова, Захаров, 2019), температурные деформации пролетов железнодорожных мостов (Захарова, Захаров, 2018), наблюдение оползневых процессов с привлечением искусственных уголковых отражателей в условиях сильной временной декорреляции (Захаров и др., 2018).

Существует технология мониторинга динамики подстилающих покровов, специально разработанная для использования в условиях высокой временной декорреляции естественных покро-

вов. Она основана на использовании набора радарных снимков, обработанных с применением метода постоянных отражателей, обозначаемого аббревиатурой PS – Permanent Scatterers, – (Ferretti et al., 1999, 2000), (Colesanti et al., 2003a, 2003b) и вариантов развития этого метода: SQUEESAR (Ferretti et al., 2011), STAMPS (Hooper et al., 2004), метода малых базовых линий SBAS (Berardino et al., 2002) и др. Для их корректной работы необходимо наличие “постоянных отражателей” – объектов, дающих стабильный эхо-сигнал на всей серии съемок. Недостаточное их количество или недостаточная стабильность на протяжении длинной серии съемок являются ограничениями этой группы методов. Предварительная обработка и анализ данных показали, что заметная временная декорреляция даже на хорошо отражающих объектах инфраструктуры ТЭЦ и металлургического завода не позволит получить надежные результаты при использовании методов PS, поэтому данное исследование базируется на вычислении и анализе временного ряда стандартных дифференциальных интерферограмм (DInSAR).

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Технология радиолокационной интерферометрии предполагает проведение съемок с близких орбит носителя радиолокационной аппаратуры. Спутниковые радары с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 Европейского космического агентства, выполняющие регулярную съемку с повторяющихся орбит с интервалом 12 дней в С-диапазоне (длина волны  $\lambda = 5.6$  см), являются одним из наиболее подходящих источников данных для целей данной работы. Анализ архива Copernicus (см. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) выявил подходящие для интерферометрической обработки снимки территории ТЭЦ-3 спутником Sentinel-1В с октября 2016 г. по настоящее время. Съемки проводились на нисходящей части витка справа по ходу движения спутника с углом обзора  $41^\circ$  к местной вертикали. Девятого июня 2020 г., через несколько дней после катастрофы, дополнительно была выполнена съемка со спутника Sentinel-1А в той же геометрии наблюдений, что дало возможность сформировать две дополнительные интерферометрические пары с интервалом между съемками вдвое меньшей длины: 6 дней. Таким образом, в работе использованы интерферометрические пары с различными интервалами между съемками: от 6 дней до 1 г.

Использованные данные Sentinel-1 уровня обработки Single Look Complex были получены в широкозахватном интерферометрическом режиме съемки IW с использованием метода прогрессивного сканирования снимаемого участка по-

верхности лучом антенны в азимутальном направлении (terrain observation with progressive scans, TOPS (Torres et al., 2012)). Широкая полоса захвата обеспечивалась последовательной съемкой элементарных кадров при переключении угла визирования в угломестной плоскости, а периодическое повторение циклограммы сканирования с перемещающегося носителя обеспечило наращивание полосы съемки. Каждый пиксел изображения представлен комплексными отсчетами сигнала (синфазная и квадратурная компоненты). Расстояние между пикселями по наклонной дальности 2.3 м, расстояние между пикселями соседних строк в азимутальном направлении 14.1 м.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ В ЗОНЕ СЪЕМКИ

Климат региона характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха, продолжительной зимой с сильными морозами и метелями, весьма коротким дождливым и холодным летом, наличием частых и резких смен погоды. Полярный день длится с 20 мая по 24 июля, минимальное среди трех летних месяцев среднее количество осадков приходится на июль (32 мм), максимальное – на август (52 мм). Устойчивый снежный покров образуется в первой половине октября, исчезая со второй декады мая. Доминирующие ветры южной четверти зимой являются причиной переноса больших масс снега, формирования глубоких сугробов, образования застругов на снеговой поверхности. Для данного региона характерна сплошная многолетняя мерзлота. Наиболее типичны тундровые глеевые почвы, встречаются также болотные и аллювиальные почвы (Васильевская, 1980).

ТЭЦ-3 примыкает к металлургическому заводу им. Б.И. Колесникова с юго-запада, составляя с ним единую промышленную зону на краю плато Надежда. Территория окрестностей ТЭЦ-3 на снимке Google Earth показана на рис. 1. На врезке справа сверху дан увеличенный фрагмент изображения с линейкой топливных резервуаров, ориентированной по диагонали. Резервуары пронумерованы снизу вверх, от резервуара № 2 до резервуара № 5 (можно также различить круглый след от демонтированного ранее резервуара № 1). Длинной стрелкой у правого края рис. 1 показано направление полета спутника Sentinel-1, широкими стрелками показано направление радарной съемки (вправо по ходу движения носителя). Так как съемка выполняется примерно с восточного направления, западные стенки резервуаров и небольшая прилегающая к ним часть промплощадки оказываются в радиотени. Соответственно, та сторона аварийного резервуара № 5, где произошел разрыв стенки и утечка топлива (короткая

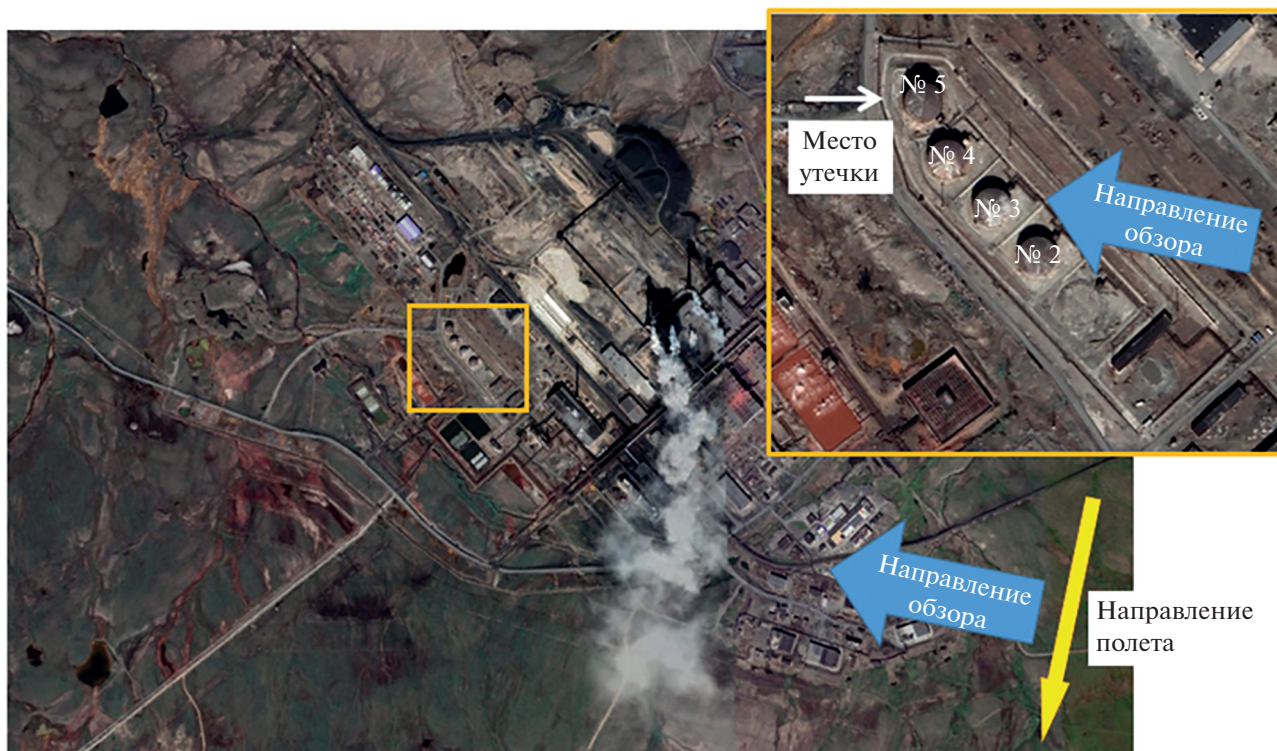


Рис. 1. Снимок территории ТЭС-3 и геометрия съемки PCA Sentinel-1 на нисходящем витке.

белая стрелка на врезке рис. 1), не видна на изображениях Sentinel-1 непосредственно.

Топливные резервуары — сооружения цилиндрической формы диаметром 45 м, центры которых расположены на расстоянии 75–78 м друг от друга. Уклон конусообразных крыш резервуаров не превышает  $20^\circ$ . Радиолокационные изображения таких объектов с гладкими в масштабе длины волны сигнала радара поверхностями отличаются от привычных оптических изображений. Доминирующий механизм взаимодействия радиоволны с гладкой металлической поверхностью конструкции резервуара — зеркальное отражение. Вследствие этого отраженный крышей сигнал  $S_R$  в геометрии съемки Sentinel-1 не возвращается к радару (рис. 2) и поэтому не регистрируется приемной антенной.

Отраженный стенками резервуаров и прилегающей поверхностью площадки сигнал состоит из двух компонент: сигнала двукратного отражения  $D$  и однократного  $S$ . Боковая стенка резервуара образует с поверхностью промплощадки двугранный угол, благодаря чему после последовательного зеркального отражения стенкой АО и поверхностью площадки ОВ сигнал возвращается к радару (см. рис. 2, лучи  $D_1$  и  $D_2$  на схеме справа). Особенностью отражения сигнала двугранным уголком является равенство длины пути для всех лучей, падающих на грани, вследствие чего резер-

вуар высотой около 20 м выглядит на радарном изображении с разрешением 2.3 м по наклонной дальности яркой точечной целью, расположенной на дальности, соответствующей вершине уголка — точке  $O$ . Мелкомасштабные смещения граней уголка приводят к смещению положения вершины  $O$  и, соответственно, изменению расстояния до радара. В отличие от зеркально отраженного крышей и ушедшего в сторону сигнала  $S_R$ , никак не влияющего на формирование радиолокационного изображения, сигнал обратного рассеяния примыкающей шероховатой поверхностью промплощадки  $S_S$  регистрируется радаром, что дает возможность наблюдать за ее динамикой даже в отсутствие двукратного отражения боковой поверхностью резервуара.

Хотя уголковый отражатель имеет широкую диаграмму обратного рассеяния, отклонение его граней от строгой взаимной ортогональности приводит к расщеплению главного лепестка диаграммы на два узких лепестка, направление которых несколько отличается от направления на радар (Кобак, 1975). Вследствие этого возможны флуктуации уровня отраженного сигнала при изменении угла наблюдения объекта радаром. Наиболее стабильной частью конструкции двугранный уголком является неровная поверхность промплощадки (линия ОВ на рис. 2). В результате увлажнения почвы после дождя условия отраже-

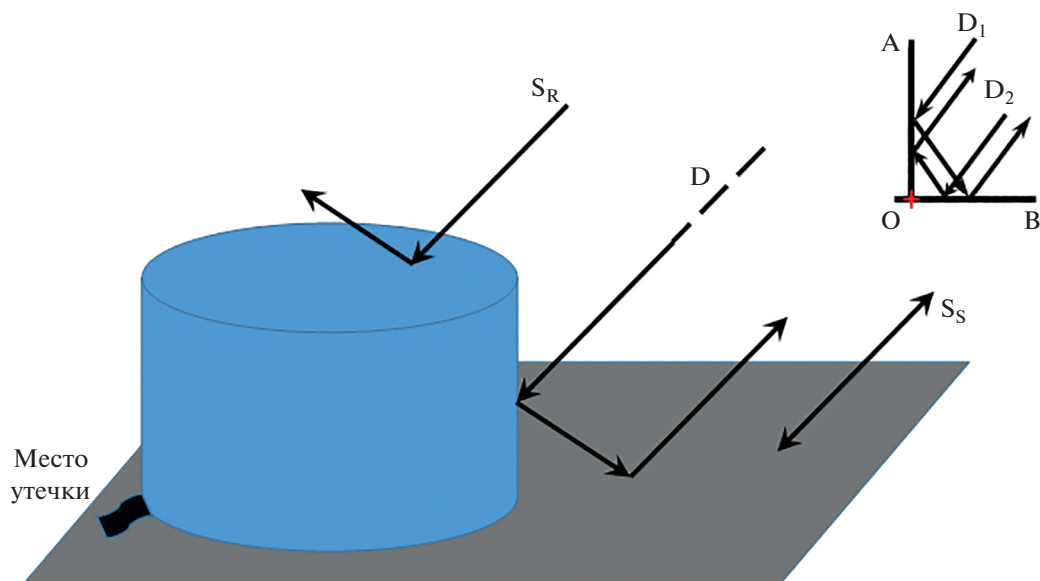


Рис. 2. Взаимодействие радиоволн с конструкцией резервуара и промплощадкой.

ния сигнала вдоль линии  $OB$  могут меняться, что может быть причиной изменения уровня и направления отраженного сигнала, а также смещения положения вершины  $O$  двугранного уголка. Наиболее часто на изученных радарных изображениях ТЭЦ-3 отмечалось снижение уровня отражения вплоть до его полного пропадания у резервуара № 3 после дождей, шедших в период до 3–5 дней перед съемкой (съемки в теплое время года с датами 8.07.2018, 20.07.2018, 13.09.2019). Другой причиной изменения условий отражения для сигналов  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $S_S$  является образование снежного покрова на прилегающей к резервуару поверхности  $OB$  в холодное время года. В работе (Захаров, Захарова, 2017) на примере анализа сигналов, отраженных опорами линии электропередач на снежной равнине, показано, что, например, равномерный свежий снежный покров толщиной 4 см с плотностью снега 0.25 приводит к увеличению электрической длины пути сигнала от радара до эффективного фазового центра отражения на величину порядка 1 см. Такого рода добавки могут быть неверно интерпретированы как смещения/просадки отражающей поверхности. Кроме того, неравномерный снежный или снежно-ледовый покров площадки вдоль линии  $OB$  может быть причиной видимой неортогональности граней и соответствующего снижения уровня отражения. Вероятно, по этой причине заметное снижение уровня отражения резервуаром № 3 наблюдалось, например, в условиях заснеженной поверхности почвы в дни съемок 24.10.2018, 6.12.2019, 28.02.2020, 11.03.2020. Падение уровня сигнала, отраженного резервуаром №5, отмечено

в дни съемки 10.11.2017, 5.11.2018, 17.11.2018, 29.11.2018, 28.05.2019, 19.10.2019.

#### МЕТОДЫ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В основе метода радарной интерферометрии лежит использование информации о разности фаз радиолокационных эхо-сигналов, зарегистрированных радиолокационной системой в двух близких точках пространства, для которых выполняется условие взаимной когерентности сигналов. При этом разность фаз сигналов зависит от разности расстояний до цели и несет информацию о рельефе поверхности, а в двухпроходном варианте еще и об изменении условий прохождения сигнала до цели за время между съемками (Rosen et al., 2000), (Захаров и др., 2015).

Интерферограмма – это изображение, состоящее из разности фаз сигналов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , получаемое в результате поэлементного комплексного перемножения отсчетов сигналов  $U_1$  и  $U_2$ , отраженных одним и тем же элементом поверхности, но принятых в двух точках, отличающихся по расположению в пространстве. Выражение для комплексной интерферограммы в двухпроходной схеме съемки таково:

$$U_1 U_2^* = u_1 u_2 \exp(j(\varphi_1 - \varphi_2)) = u_1 u_2 \exp\left(\frac{-j4\pi\Delta r}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – амплитуды сигналов,  $\Delta r$  – разность расстояний от точек съемки до выбранного элемента поверхности,  $\lambda$  – длина волны.

Точность измерений разности фаз на интерферограмме определяется когерентностью отражен-

ных протяженной поверхностью радиолокационных сигналов. Интерферометрическая когерентность характеризует ошибки измерений разности фаз и, соответственно, относительную, межпиксельную точность измерения высот рельефа и подвжек подстилающей поверхности (Bamler, Hartl, 1984). Степень когерентности сигналов может быть оценена непосредственно по радарным данным, она определяется следующим выражением:

$$\gamma = \frac{E\{U_1 U_2^*\}}{\sqrt{E\{|U_1|^2\} E\{|U_2|^2\}}}, \quad (2)$$

где  $E\{\}$  – операция взятия математического ожидания по некоторому пространственному ансамблю отсчетов с центром в текущем элементе/пикселе изображения. Аналитическое выражение зависимости дисперсии разности фаз от когерентности в соответствии с граничными условиями Крамера-Рао из (Rodríguez, Martín, 1992) таково:

$$\sigma^2(\Delta\varphi) = \frac{1}{2N_L} \frac{1-\gamma^2}{\gamma^2}, \quad (3)$$

где  $N_L$  – количество отсчетов в пространственном ансамбле. В соответствии с этим, следствием снижения когерентности является возрастание дисперсии интерферометрической разности фаз.

В идеальных условиях стабильной поверхности и ничтожно малых шумов аппаратуры основной вклад в разность фаз на интерферограмме  $\varphi$ , зависящей от разности наклонных дальностей, вносит “топографическая” фаза  $\varphi_{topo}$ , передающая вариации рельефа поверхности. В общем случае на величину разности фаз  $\varphi$ , кроме рельефа, влияют также мелкомасштабные площадные смещения поверхности (динамика поверхности) за время между съемками  $\varphi_d$ , атмосферные флуктуации электрической длины пути сигнала радара  $\varphi_a$ , флуктуации электрической длины пути сигнала радара  $\varphi_s$  в снежно-ледовом слое, накапливаемом на земле в холодное время года, случайные смещения положения фазового центра отражения сигнала из-за пространственной и временной декорреляции –  $\varphi_{spat}$  и  $\varphi_{temp}$ , шумы приемной системы (включая шумы квантования АЦП)  $\varphi_n$ , шумы, вносимые системой обработки  $\varphi_p$ , а также неизвестная начальная разность фаз  $\varphi_0$ , единая для всей интерферограммы (Захаров и др., 2015):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_s + \Delta\varphi_{spat} + \Delta\varphi_{temp} + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_0. \quad (4)$$

Шумы пространственной и временной декорреляции, а также тепловые шумы определяют меж-

пиксельную точность измерений, они могут быть снижены пространственной фильтрацией интерферограммы при неизбежном снижении пространственного разрешения.

Для обработки интерферометрических пар снимков применен метод классической дифференциальной интерферометрии, когда топографическая фаза  $\varphi_{topo}$  на интерферограмме оценивается по данным внешней цифровой модели рельефа и вычитается. С этой целью была использована общедоступная цифровая модель рельефа GMTED (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data), доступная по адресу <https://www.usgs.gov/core-science-systems/eros/coastal-changes-and-impacts/gmted2010>. Для снижения уровня шумов и приведения к одинаковому линейному разрешению по азимуту и дальности выполнялось некогерентное суммирование четырех соседних по дальности пикселей интерферограммы. Дополнительно выполнялась нелинейная фильтрация интерферограммы фильтром Голдстина (Goldstein, Werner, 1998) с эффективным размером окна  $5 \times 5$ . Сравнительно крупномасштабные флуктуации фазы на атмосферных неоднородностях, равно как и добавка в виде неизвестной начальной фазы  $\varphi_0$  могут быть оценены по сигналу заведомо стабильного близлежащего объекта поверхности и исключены из (4).

Уровень фазовых шумов  $\varphi_p$ , обусловленных временной декорреляцией, зависит от интервала между съемками сеансов интерферометрической пары. Временная декорреляция возрастает при увеличении интервала между съемками, при изменении шероховатости и диэлектрических свойств слоя отражающей поверхности, а потому при составлении интерферометрических пар предпочтительно использовать снимки с небольшим интервалом между съемками, выполненные в сходных сезонных и метеорологических условиях, а также степени увлажненности покровов.

Под шумами обработки  $\varphi_p$  обычно понимают шумы вычислений, обусловленные конечным количеством разрядов при цифровом представлении сигнала, однако использование данных Sentinel-1 вносит свои особенности. Из-за большой крутизны краев доплеровского центроида в элементарном кадре для режима съемки TOPS ошибки совмещения снимков Sentinel-1 из разных сеансов съемки приводят к заметному набегу фазы по полю кадра как в азимутальном, так и поперечном направлении. Так, по оценкам (Lanari et al, 2015), ошибки совмещения порядка нескольких тысячных пиксела дают заметный, в несколько градусов, фазовый набег на краях кадра. Следовательно, ошибки совмещения снимков могут быть источником неконтролируемых фазовых ошибок на интерферограммах.

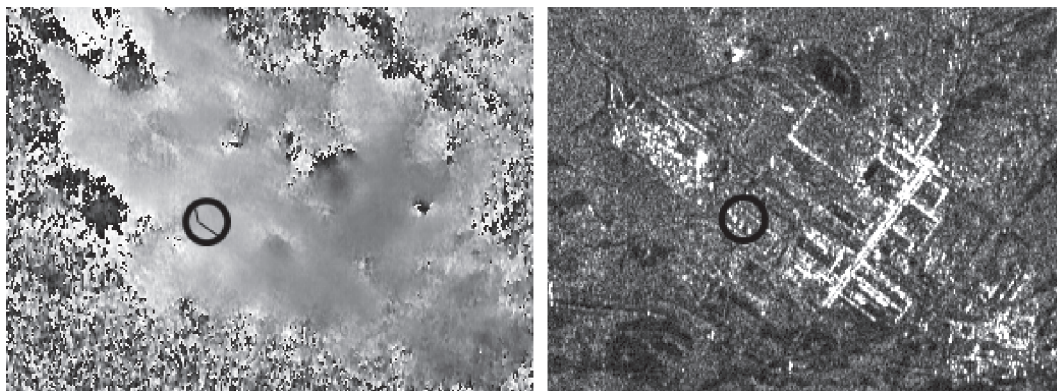


Рис. 3. Фрагменты интерферограммы (слева) и амплитудного изображения Sentinel-1 (справа) для интерферометрической пары 10 мая–3 июня 2020 г.

Точность фазовых измерений при съемке в средних и высоких широтах снижается из-за резкого изменения диэлектрических свойств подстилающих покровов и выпадения/таяния снега в холодное время года. В работе (Guneriussen et al., 2001) установлена несложная связь между приращением односторонней длины пути (и фазы) сигнала и приращением толщины снежного покрова за время между съемками. Однако получить достаточно точные фазовые поправки, опираясь на сведения о толщине слоя выпавшего снега по данным близлежащих наземных метеостанций, невозможно по причине локальных особенностей снегопада, переноса снега ветрами на открытых территориях, а также работ по расчистке/уборке снега в зоне съемки.

Выделенная с некоторой степенью точности разность фаз  $\Delta\varphi_d$  связана с изменением разности наклонных дальностей вследствие смещения поверхности  $\Delta r_d$  за время между съемками следующим соотношением:

$$\Delta\varphi_d = -4\pi\lambda^{-1}\Delta r_d. \quad (5)$$

Необходимо подчеркнуть, что изменение односторонней длины пути сигнала за время между съемками интерферометрической пары снимков на половину длины волны (2.8 см для PCA Sentinel-1) приводит к дополнительному фазовому набегу  $2\pi$ , что не позволяет выявить это изменение. Добавим, что появление слоя свежего снега толщиной около 10.5 см с ранее приведенными физическими параметрами за время между съемками также дает фазовую добавку  $2\pi$ , и также не может быть обнаружено.

Первые представления о наличии или отсутствии динамики подстилающей поверхности на территории ТЭЦ-3 по данным интерферометрической обработки данных Sentinel-1В в период 10 мая–03 июня 2020 г. (между этими датами произошла авария) были описаны в работе (Захаров и др., 2020).

На интерферограмме (рис. 3, слева) полутонами переданы вариации интерферометрической разности фаз от 0 до  $2\pi$ , которым соответствуют возможные радиальные смещения поверхности в диапазоне от 0 до 2.8 см. Справа приведено соответствующее интерферограмме амплитудное изображение, на котором кружком обведены эхо-сигналы резервуаров № 2–№ 5. Внутри кружка на интерферограмме показано положение профиля разности фаз, проходящего через все четыре резервуара с северо-запада на юго-восток. Значения фазы вдоль этого профиля отклонились бы от постоянного значения при смещении резервуаров, которое могло быть вызвано таянием мерзлотного грунта. Для исследования влияния иных эффектов на положение резервуаров, например, морозного пучения зимой, в дополнение к таянию вечной мерзлоты в теплое время года, были также проанализированы интерферограммы, приходящиеся на осенне-зимний период 2019–2020 гг. Оказалось, что относительно начала профиля, где в качестве опорной точки взято положение одного, предположительно стабильного, резервуара, все флуктуации положения остальных резервуаров, включая поврежденный, находятся в пределах 2–3 мм на всех интервалах наблюдения. Сделано заключение, что морозное пучение зимой 2019–2020 гг. и таяние почв в районе ТЭЦ-3 в апреле–мае 2020 г. не привели к сколь-нибудь заметным смещениям восточных стенок резервуаров и прилегающей к ним поверхности промплощадки (Захаров и др., 2020).

#### АНАЛИЗ КРАТКОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ С ИЮЛЯ 2019 ГОДА ПО АВГУСТ 2020 ГОДА

Возможными причинами повреждения резервуара №5 могли быть более ранние подвижки подстилающей поверхности, для чего временной

интервал интерферометрических наблюдений необходимо расширить, вместе с тем учитывая, что существенным ограничивающим фактором при обработке пар снимков с большим интервалом между съемками является рост временной декорреляции отражений. Общепринятым решением задачи мониторинга медленных подвижек поверхности в условиях высокой временной декорреляции является применение метода постоянных отражателей PS (Ferretti et al., 1999) и аналогичных ему методов. Особенностью метода PS является необходимость использования длинных рядов наблюдений и применение методов статистического анализа для выявления надежных отражателей. Критерием выбора точек-кандидатов в постоянные отражатели является стабильность отражения сигнала. Анализ стабильности отражения резервуарами на интервале с октября 2017 г. по июль 2020 показал, что они не удовлетворяют критерию стабильности из (Ferretti et al., 1999, 2000), (Colesanti et al., 2003a, 2003b). Отношение стандартного отклонения амплитуды сигнала к среднему значению в серии из 40 снимков равно 0.6 для резервуара № 2, 0.93 для № 3, 0.81 для № 4 и 0.98 для № 5. Причиной столь высокой нестабильности может быть влияние атмосферных осадков, а также процессов таяния/замерзания снега на характеристики двойного переотражения сигнала крупными конструкциями, составленными стенкой резервуара и прилегающей к нему поверхностью промплощадки. Неизбежные резкие изменения фазы отраженных сигналов из-за изменения радиофизических свойств подстилающих покровов отличаются от предполагаемых в методе PS медленных монотонных изменений, а потому методы семейства PS не в состоянии в данном случае надежно идентифицировать резервуары как постоянные отражатели, и, таким образом, они не могут считаться надежным инструментом для измерения возможных смещений резервуаров. По этой причине в дальнейшем в первую очередь будут обсуждаться измерения, проведенные с использованием серии классических дифференциальных интерферограмм, причем измерения фазы и дальнейшие оценки динамики резервуаров будут выполняться в точках расположения резервуаров, для которых зафиксирован максимальный уровень отражения.

Для анализа стабильности территории ТЭЦ-3 в период с июля 2019 по август 2020 г., предположительно охватывающий основные процессы смещения отражающих объектов, были построены дифференциальные интерферограммы с 12-дневными интервалами между съемками. В качестве опорных, предположительно стабильных деталей на отражающей поверхности были выбраны три объекта: трубопровод над дорогой (500 м к северо-востоку от резервуаров), трехгранный уголок, образованный прямым углом здания и поверхно-

стью промплощадки (1050 м в направлении восток-юго-восток), и элемент у внутренней стороны ограды территории резервуаров (70 м к юго-западу от отражающей стенки резервуара № 3). Фрагменты снимков Google Earth этих объектов приведены на рис. 4, где стрелками показано их расположение. В пределах элементарного кадра Sentinel-1 первые два — это наиболее стабильные точечные объекты с высоким уровнем интерферометрической когерентности, вероятно, из-за небольших (по сравнению с резервуарами) геометрических размеров этих объектов. Уровень когерентности сигналов этих объектов превышает 0.95 во всех парах снимков, сделанных в июле 2019—августе 2020 гг., за исключением пар, содержащих сентябрьские снимки, когда когерентность снижалась до 0.85, и апрельских с когерентностью 0.7. Как можно судить по некоторым зимним интерферограммам, особенностью первого из них, трубопровода над дорогой, является однократное рассеяние сигнала радара конструкцией трубы, обычно не укрытой снежным слоем. Для здания как уголкового отражателя характерно последовательное отражение от двух стен технического здания и прилегающей поверхности промплощадки. В этом случае возможно влияние слоя снега, лежащего на площадке. Поскольку у этого объекта когерентность отражений оказалась самой высокой на всех интерферограммах, он был выбран в качестве опорного.

На рис. 5 приведен временной ход разностей фаз для четырех резервуаров № 2—№ 5 на интервале 12 дней в период с июля 2019 по август 2020 г.

На этом рисунке видна высокая стабильность (повторяемость графиков) разности фаз топливных резервуаров для 12-дневных интервалов наблюдения динамики относительно опорного объекта и относительно друг друга летом 2019 г., в декабре—марте и мае—августе 2020 г. (небольшие отклонения от нуля на графике). Отклонения фаз для резервуаров в мае—августе составляют 0.2—0.3 рад, что соответствует их возможным взаимным смещениям в направлении на спутник 0.9—1.3 мм.

На рис. 6 приведены сведения о среднесуточной температуре и высоте снежного покрова на метеостанции Норильска по данным веб-архива [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru). Отметим влияние вариаций диэлектрических свойств отражающих покровов в результате выпадения снеговых осадков 13 сентября, в период с октября 2019 по январь 2020 г., а также таяния/замерзания снежно-ледовых покровов в апреле 2020 г. на сильный рост флуктуаций фаз сигналов резервуаров в это время. Отметим, что из-за 2 $\pi$ -неоднозначности фазовых измерений возможны ошибки, приводящие к занижению реальных флуктуаций фазы и соответствующей ей длины пути сигнала.



Рис. 4. Фрагменты снимков Google Earth, содержащие опорные объекты: трубопровод (слева), внутренний угол здания (в центре) и сооружение у ограждения резервуаров (справа).

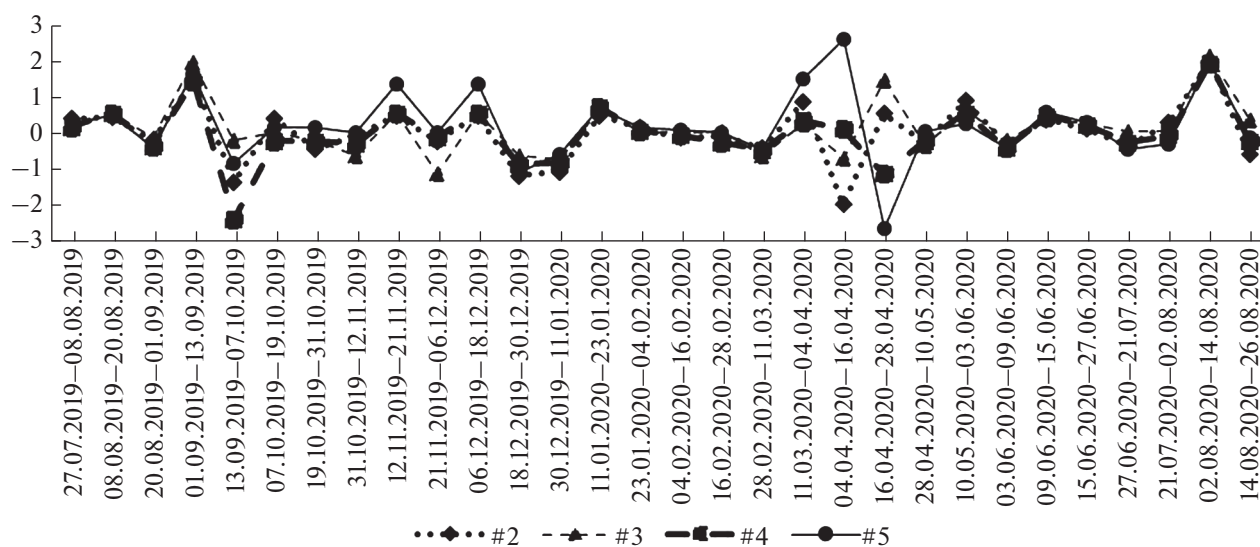


Рис. 5. Временной ход смещений фазы сигнала резервуаров относительно трубопровода (в радианах), в период с 27.07.2019 по 26.08.2020.

Переход среднесуточной температуры воздуха через ноль в апреле и вызванное этим интенсивное снеготаяние также стали причиной роста флуктуаций положения фазового центра отражения сигнала двугранными уголками резервуаров и повышения разброса фазовых измерений. Аналогичным образом, выпадение снега осенью, ветровая модификация толщины снежных покровов, снегоуборка на территории промзоны стали причиной случайных изменений толщины снежного покрова вблизи резервуаров и роста флуктуаций фазы (см. левую часть рис. 6). Падение когерентности сигналов резервуаров в среднем от 0.92 до 0.7–0.8 осенью и в начале зимы, а также до 0.6–0.7 в апреле является хорошим индикатором причины резкого роста фазовых флуктуаций. В то же время можно утверждать, что измерения фазы отраженных сигналов резервуарами свидетель-

ствуют о высокой (порядка 1.3 мм) стабильности взаимного положения резервуаров и поверхности промплощадки в мае–августе 2020 г. на коротких, 12-дневных интервалах при условии высокой интерферометрической когерентности.

Теоретическая оценка точности интерферометрических измерений в принятой методике обработки может быть получена исходя из уровня когерентности сигналов, отраженных резервуарами. Приведенная выше формула (2) дает достаточно точные оценки фазовых ошибок при условии высокого уровня когерентности. Приняв  $\gamma = 0.9$ , получим стандартное отклонение фазы равным 0.34 радиан. Соответствующая ошибка измерения радиальных смещений не превышает 1.5 мм, что соответствует экспериментальным оценкам, сделанным выше.



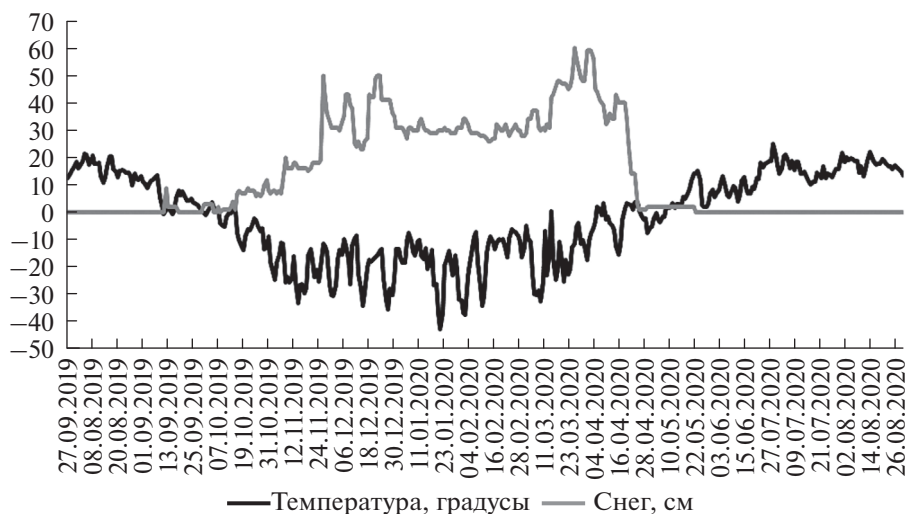


Рис. 6. Среднесуточная температура воздуха и толщина снежного покрова.

Отдельно необходимо прокомментировать фазовые измерения по резервуару № 5, к разборке которого приступили в конце июля 2020 г.: несмотря на отсутствие сигнала двойного переотражения, по фазе сигнала  $S_S$ , отраженного поверхностью промплощадки в месте расположения резервуара, можно судить о сохраняющейся стабильности положения подстилающей поверхности в процессе разборки резервуара и далее, в августе 2020 г.

#### АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ НА ГОДИЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Для выявления монотонных медленных смещений подстилающих покровов на больших интервалах времени наиболее удобно проводить измерения на серии дифференциальных интерферограмм с нарастающим временным интервалом между съемками и единым базовым сеансом съемки. В качестве базового нами был выбран сеанс от 1 сентября, последний из проведенных в теплую сухую погоду в начале осени. Фазовые измерения для резервуара № 5 по 23 интерферограммам в период с 1 сентября 2019 г. по 21 июля 2020 г. даны на рис. 7 сплошной линией. По оси абсцисс отложены даты второй съемки в интерферометрической паре. Особенностью таких интерферограмм с длинными интервалами является снижение когерентности до 0.6–0.7 у резервуаров в зимнее время из-за роста временной декорреляции отражений и неизбежное снижение точности измерений.

Для сравнения сформируем подобный график, выполнив суммирование с накоплением разностей фаз на коротких интервалах с рис. 5 для резервуара № 5. Особенностью такого варианта из-

мерений фазы является накопление ошибок измерений на коротких интервалах, хотя и при более высокой точности отдельных измерений (более высокой интерферометрической когерентности из-за более коротких временных интервалов).

На рис. 7 пунктирной линией показан результат такого накопления на годичном интервале времени, начиная с 1 сентября 2019 г. По оси абсцисс отложена конечная точка интервала накопления.

Почти совпадающие в начале интервала графики фазы разбегаются в холодное время года на величину порядка 2 радиан из-за роста ошибок измерений в условиях пониженной когерентности сигналов интерферометрических пар. Отметим неуклонный рост разности фаз с октября по март, который, скорее всего, обусловлен накоплением снега в результате снегопадов и ветрового переноса снега. Различие в измерениях снижается после схода снежного покрова в апреле. Начиная с мая значения фазы близки к  $-0.5$  рад, что близко к ошибкам измерений, хотя и может быть интерпретировано как смещение фазового центра отражения резервуара на 2 мм вверх. Можно утверждать, что зимний рост разностей фаз — это результат накопления снега вблизи резервуара, а не монотонного проседания, закончившегося в апреле возвращением отражающего объекта в исходное положение.

Для проверки достоверности околонулевых значений фаз после таяния снежного покрова были обработаны 18 пар снимков с длительными, более полугода, интервалами между съемками, полученные исключительно в теплое время года и содержащие зимний период внутри интервала. При выборе достоверных фазовых измерений бы-

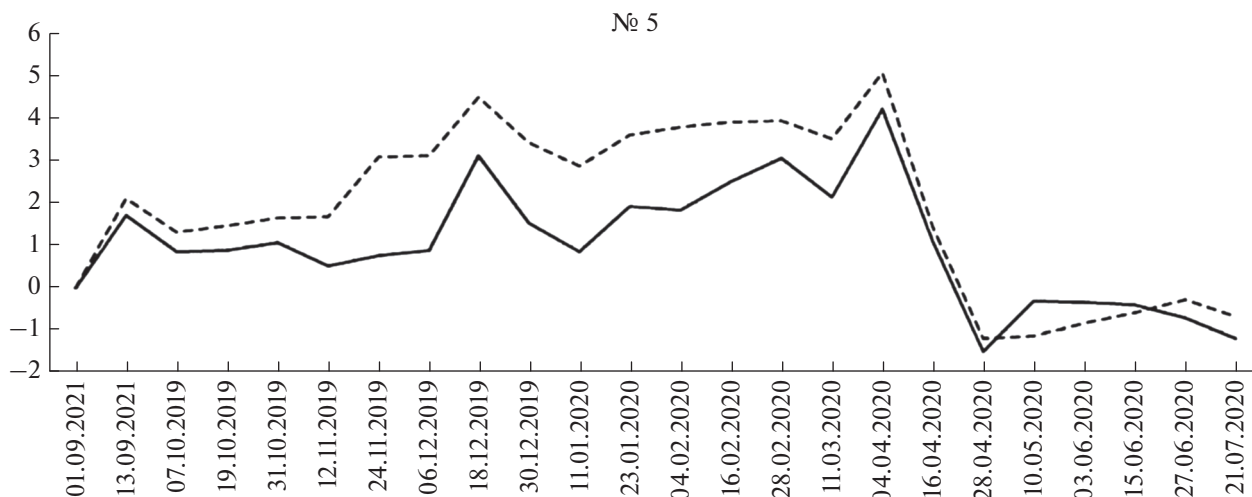


Рис. 7. Рост разностей фаз сигналов резервуара № 5 (в радианах) на годичном интервале времени при увеличении интервала времени между съемками (сплошная линия) и накоплении измерений коротких интервалов (пунктирная линия).

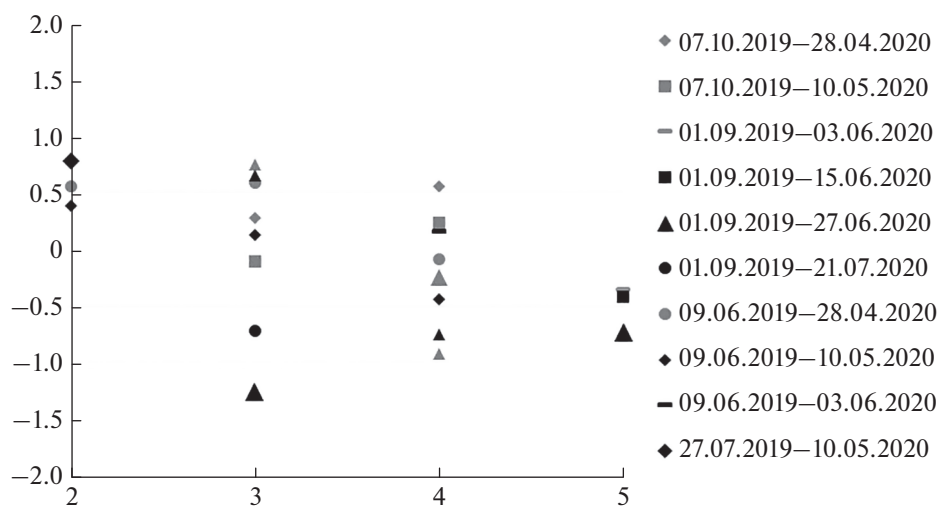


Рис. 8. Фазовые измерения для резервуаров при длинных интервалах времени между съемками.

ли исключены измерения, которым сопутствовала когерентность ниже 0.8. Оказались исключены летние съемки, особенностью которых было наличие осадков в день съемки или же суммарное количество осадков оказалось больше 4 мм за 5 дней перед одной из съемок. На рис. 8 приведены фазовые измерения для четырех резервуаров на 10 интерферометрических парах с длинными, от 6 до 12 месяцев интервалами между съемками в период с июля 2019 по июль 2020 г.

Исходя из заданных требований уровня когерентности, на резервуары № 2 и № 5 пришлось по 3 измерения, а на резервуары № 3 и № 4 по 8 измерений. Среднее значение фазы равно 0.6 рад для резервуара № 2, 0.06 рад для № 3,  $-0.17$  рад

для № 4 и  $-0.49$  рад для № 5. Видно, что взаимное положение резервуаров по фазе находится в пределах 1 рад, что эквивалентно потенциальному взаимному смещению на 0.4 см по наклонной дальности.

Подобный уровень стабильности взаимного положения резервуаров на годичных интервалах наблюдается и несколькими годами ранее, в материалах обработки данных PCA Sentinel-1, полученных в период 2017–2019 гг. Три набора измерений фазы для топливных резервуаров на летних интерферограммах с годичным интервалом приведены в табл. 1. Условием отбора этих пар снимков было отсутствие значимых осадков в день съемки, а также за несколько дней до съемки.

**Таблица 1.** Фазовые измерения по резервуарам на годовых интерферограммах, рад

Даты съемки	Резервуар №2	Резервуар №3	Резервуар №4	Резервуар №5
25.07.2017–20.07.2018	0.1	0.1	0.6	0.5
20.07.2018–27.07.2019	–0.9	–0.7	–1.2	–0.9
27.07.2019–10.05.2020	0.8	–1.6	–1.1	0.4

Несмотря на выявленную повышенную нестабильность отражений на коротких интервалах съемки в осенний и весенний периоды внутри периода холодного времени 2019–2020 гг., измерения из табл. 1 говорят о довольно высокой стабильности положения отражающих центров резервуаров на годовых интервалах в 2017–2019 гг. Среднеквадратичное отклонение флюктуаций фазы на каждой интерферограмме находится в пределах 0.7–1 рад, что соответствует флюктуациям положения объектов в пределах 4.5 мм. Эти результаты позволяют сделать предположение о стабильности положения топливных резервуаров ТЭЦ-3 и прилегающих к ним участков промплощадки. При этом необходимо помнить, что сравнительно низкое, хуже 10 м, пространственное разрешение использованных радарных данных не дает возможности выявлять возможные площадные смещения участков поверхности меньшего линейного размера, которые могли бы быть причиной повреждения резервуара № 5.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов радарной интерферометрии для наблюдения стабильности топливных резервуаров ТЭЦ-3 с целью прояснения причины аварии на пятом резервуаре, повлекшей утечку большого объема дизельного топлива в окружающую среду, сильно осложняется искажающим влиянием атмосферных осадков, нарастания снежного покрова в холодное время года и его таяния весной. Особенностью отражения сигнала резервуаром является двойное отражение сигнала последовательно его боковой стенкой и прилегающим участком промплощадки ТЭЦ-3. Смачивание/высыхание поверхности прилегающей площадки, нарастание на ней снежного покрова в зимнее время и его таяние весной приводят к изменениям отражательных свойств этой грани двугранного уголка, смещениям положения фазовых центров отражения, ошибкам интерферометрических измерений разности фаз сигналов повторяющихся съемок. Результаты исследования вариаций интерферометрической разности фаз в местах расположения резервуаров позволяют сделать заключение о том, что взаимное положение всех четырех резервуаров ТЭЦ (их восточных стенок) и прилегающей к ним территории было стабильно в диапазоне 2–3 мм при измерениях на 12-дневных интервалах времени осенью

2019–летом 2020 гг., в том числе на 24-дневном интервале времени, охватывающем аварийное событие. В теплое время интервала наблюдений этого периода взаимная стабильность положения резервуаров находилась в пределах 1.3 мм. При годовых интервалах времени между съемками флюктуации положения резервуаров не превышают 4.5 мм, в том числе в 2017–2018, 2018–2019 гг. Можно предположить, что разгерметизация резервуара не была вызвана площадными смещениями отражающих поверхностей и конструкций на территории ТЭЦ-3, по крайней мере, с июля 2017 г.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Извест. высш. уч. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Васильевская В.Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: “Наука”, 1980. 236 с.
- 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.
- Захаров А.И., Захарова Л.Н.* Наблюдения динамики снежного покрова на радарных интерферограммах L-диапазона // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 190–197.
- Захаров А.И., Захарова Л.Н., Красногорский М.Г.* Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголкового отражателя // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92.
- Захаров А.И., Захарова Л.Н., Митник Л.М.* Мониторинг стабильности топливных резервуаров Норильский ТЭЦ-3 методами радарной интерферометрии // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 281–285.

- Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М.* Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: URSS, 2015. 248 с.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И.* Обнаружение динамики мостов методом радиолокационной интерферометрии // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 42–51.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И.* Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277.
- Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. М.: Сов. Радио, 1975. 348 с.
- Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. V. 14. P. R1–R54.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383.
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F.* SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003a. V. 41. P. 1685–1700.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique // Engineering Geology. 2003b. V. 68 P. 3–14.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A.* A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. V. 49. № 9. P. 3460–3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS-1999). 28 June–2 July 1999. Hamburg, Germany. 1999. V. 3. P. 1528–1530.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000. V. 38. № 5. P. 2202–2212.
- Goldstein R.M., Werner C.L.* Radar interferogram filtering for geophysical applications // Geophys. Res. Letters. 1998. V. 25. № 21. P. 4035–4038.
- Guneriussen T., Høgda K.A., Johnsen H., Lauknes J.* InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2001. V. 39. № 10. P. 2101–2108.
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № 23. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Lanari R., Berardino P., Bonano M., Casu F., De Luca C., Elefante S., Fusco A., Manunta M., Manzo M., Ojha C.* Sentinel-1 results: SBAS-DInSAR processing chain developments and land subsidence analysis // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2015). 2015. P. 2836–2839.
- Rodríguez E., Martín J.M.* Theory and design of interferometric synthetic-aperture radars // Proc. IEEE. 1992. V. 139. № 2. P. 147–159.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M.* Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333–392.
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., Bibby D., Davidson M., Attema E., Potin P., Rommen B., Floury N., Brown M., Navas Traver I., Deghaye P., Duesmann B., Rosich B., Miranda N., Bruno C., L'Abbate M., Croci R., Pietropaolo A., Huchler M., Rostan F.* GMES Sentinel-1 mission // Remote Sens. Environ. 2012. V. 120. P. 9–24.

## On The Long-Term Stability of the Norilsk TPP-3 Fuel Tanks Dynamics According to Sentinel-1 SAR Data

A. I. Zakharov<sup>1</sup> and L. N. Zakharova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Russia*

The results of the interferometric processing and analysis of European spaceborne synthetic aperture radar (SAR) Sentinel-1 acquired over the territory of Norilsk thermal power plant TPP-3 in July 2017–August 2020 are presented. Twelve days differential interferograms allowed the estimation of the stability of all TPP-3 oil reservoirs position with respect to reference knowingly stable targets. Strong distorting influence of meteorological precipitation, as well as freeze-thaw processes of snow covers on the TPP-3 territory on the quality of interferometric phase measurements was noted. It was found that on all the twelve-days interferometric observation intervals from July 2019 to August 2020 made in warm seasons the relative position of all four reservoirs and adjacent territory is stable within the accuracy of about 1.3 mm. According to observations of the reservoirs during July 2017–August 2020 using summer interferograms with one-year interval between images acquisitions, their long-term stability of the position is about 4 mm. We can conclude that the reservoir damage was not caused by areal displacements of the reflecting surfaces in the study area, supposedly, due to the melting of permafrost in the area of the reservoirs.

**Keywords:** Norilsk, fuel storage tank, synthetic aperture radar interferometry, Sentinel-1, corner reflector, surface dynamics

## REFERENCES

- Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // *Inverse Problems*. 1998. V. 14. P. R1–R54.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. 2375–2383.
- Bondur V.G.* Aerokosmicheskiye metody i tekhnologii monitoring neftegazonosnyh territoriy i ob'ektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018.  
<https://doi.org/10.1134/S0001433811090039>
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs of aerospace imagery processing and classification] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 2001. № 3. P. 118–143. (In Russian)
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F.* SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. V. 41. P. 1685–1700.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique // *Engineering Geology*. 2003. V. 68. P. 3–14.
- Dagurov P.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I., Zakharov A.I., Chimtdorzhiev T.N.* Radiolokatsionnaya interferometriya sezonnyh deformatsiy pochvy i fazovaya model' obratnogo rassejaniya mikrovoln dvuhslonnoj sredoy s sferohovatyimi granicami [Radar interferometry of the soil's seasonal deformations and the phase model of backscattering of microwaves by a two-layer medium with rough boundaries] // *Optics of atmosphere and ocean*. 2016. V. 29. № 7. P. 585–591.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20160709> (In Russian)
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A.* A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011. V. 49. № 9. P. 3460–3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-1999)*. 1999. V. 3. P. 1528–1530.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000. V. 38. № 5. P. 2202–2212.
- Goldstein R.M., Werner C.L.* Radar interferogram filtering for geophysical applications // *Geophys. Res. Letters*. 1998. V. 25. № 21. P. 4035–4038.
- Guneriussen T., Hogda K.A., Johnsen H., Lauknes I.* InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2001. V. 39. № 10. P. 2101–2108.
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 23. P. L23611.  
<https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Kobak V.O.* Radiolokatsionnye otrazhateli [Radar reflectors]. M.: Sov. Radio, 1975. 348 p. (In Russian)
- Lanari R., Berardino P., Bonano M., Casu F., De Luca C., Elefante S., Fusco A., Manunta M., Manzo M., Ojha C.* Sentinel-1 results: SBAS-DInSAR processing chain developments and land subsidence analysis // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2015)*. 2015. P. 2836–2839.
- Rodríguez E., Martín J.M.* Theory and design of interferometric synthetic-aperture radars // *Proc. IEEE*. 1992. V. 139. № 2. P. 147–159.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M.* Synthetic aperture radar interferometry // *Proc. IEEE*. 2000. V. 88. № 3. P. 333–392.
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., Bibby D., Davidson M., Attema E., Potin P., Rommen B., Floury N., Brown M., Navas Traver I., Deghaye P., Duesmann B., Rosich B., Miranda N., Bruno C., L'Abbate M., Croci R., Pietropaolo A., Huchler M., Rostan F.* GMES Sentinel-1 mission // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 120. P. 9–24.
- Vasilievskaya V.D.* Pochvoobrazovanie v tundrah Srednej Sibiri [Soils formation in the tundra of Central Siberia]. M.: Nauka, 1980. 236 p. (In Russian)
- Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M.* Sputnikovyy monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverhnosti [Earth satellite monitoring: Radar sensing of covers.] M.: URSS, 2015. 248 p. (In Russian)
- Zakharov A.I., Zakharova L.N.* Nabljudeniya dinamiki snezhnogo pokrova na radarnykh interferogrammakh L-diapazona [Observation of snow cover dynamics on L-band SAR interferograms]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. V. 14. № 7. P. 190–197. (In Russian)
- Zakharov A.I., Zakharova L.N., Krasnogorsky M.G.* Monitoring opolznevoj aktivnosti metodami radarnej interferometrii s pomoshh'ju trehgrannykh ugolkovykh otrazhatel'ey [Monitoring landslide activity by radar interferometry using trihedral corner reflectors] // *Issled. Zemli iz Kosmosa*. 2018. № 3. P. 80–92. (In Russian)
- Zakharov A.I., Zakharova L.N., Mitnik L.M.* Monitoring stabil'nosti toplivnykh rezervuarov Noril'skoj TJeC-3 metodami radarnej interferometrii [Monitoring of the Noril'sk TPP-3 fuel tanks stability by means of radar interferometry technique] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 5. P. 281–285. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I.* Obnaruzhenie dinamiki mostov metodom radiolokatsionnoj interferometrii [Detection of bridges instability by means of SAR interferometry] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 2. P. 42–51. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I.* Nabljudenie dinamiki zony opolznja na reke Bureja po dannym interferometricheskoy sjomki 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. V. 16. № 2. P. 273–277. (In Russian)