

Влияние снежного покрова на наблюдения топливных баков ТЭЦ-3 Норильска методами космической радарной интерферометрии

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова, В.П. Синило

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал 141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1.

E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

Приведены результаты исследования влияния снежного покрова на измерения положения топливных баков ТЭЦ-3 Норильска методами космической радарной интерферометрии. Материалом для исследования были снимки спутниковых радаров с синтезированной апертурой Sentinel-1 по территории Норильской ТЭЦ-3. Сформированные интерферограммы охватывают холодные интервалы времени осени-зимы 2019-2020 г., а также событие разгерметизации бака с дизельным топливом. Показано, что накопление снега на поверхности промплощадки вблизи баков оказывает искажающее влияние на результаты мониторинга стабильности положения баков. Предложен вариант подбора условий радиолокационных наблюдений, свободный от подобных искажений. По результатам обработки сделано заключение о высокой стабильности положения топливных баков ТЭЦ-3 на годичном интервале времени.

Ключевые слова: Норильск, топливный бак, радиолокационная интерферометрия, Sentinel 1, динамика поверхности

An influence of snow layer on the observations of Norilsk TPP-3 fuel tanks by means of satellite radar interferometry

A.I. Zakharov, L.N. Zakharova, V.P. Sinilo

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

The results of study of snow cover influence on the interferometric measurements stability of Norilsk TPP-3 fuel tanks location are presented. Sentinel-1 synthetic aperture radar data acquired over the territory of Norilsk TPP-3 were used in the study. Radar interferograms created cover the cold season of 2019-2020 as well as warm season of 2020, including catastrophic event - the rupture of the tank with diesel fuel. It was shown that accumulation of snow on the surface near the tanks has a distorting effect on the results of monitoring the stability of the tanks location. We propose a way to select the radar data acquired in proper observation conditions (free from the distortions). According to the processing results, a conclusion about high stability of the fuel tanks on the year time interval has been made.

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

Введение

Целью данной работы является демонстрация искажающего влияния атмосферных осадков, в первую очередь снежного покрова, на измерения подвижек объектов промышленной инфраструктуры Арктического региона методами космической радиолокационной интерферометрии на примере Норильской ТЭЦ-3. Этот промышленный объект получил громкую известность из-за крупномасштабного разлива нефтепродуктов 29 мая 2020 года вследствие разгерметизации одного из четырех баков топливохранилища и утечки 21 тысячи тонн дизельного топлива. Одной из главных версий причины аварии с самого начала называлось таяние мерзлого грунта

из-за аномально теплой погоды, что могло вызвать повреждения бетонных опор, на которых стояла бетонная платформа с топливным баком.

Особенности механизмов рассеяния в окрестности топливных баков

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 [1]. Другие примеры — наблюдение сантиметровых подвижек поверхности оползневого склона на берегу реки Бурея [2], температурные деформации пролетов железнодорожных мостов [3].

Первые результаты применения этого метода с использованием радиолокационных снимков радаров с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 С-диапазона (длина волны $\lambda=5.6$ см) для наблюдения состояния топливных баков ТЭЦ-3 приведены в [4,5]. Особенность архивных материалов спутника Sentinel-1В в том, что территория ТЭЦ-3 снималась со спутника Sentinel-1В на нисходящей части витка справа по ходу движения с углом падения $\theta = 41^\circ$. На снимке Google Earth на рис. 1 желтой стрелкой показано направления полета спутника, голубой стрелкой показано направление радарной съемки. Вследствие наблюдения бака примерно с восточного направления западные стенки баков (№2-№5 на рисунке) и небольшая прилегающая к ним часть промплощадки оказываются в радиотени. Соответственно, та сторона аварийного бака №5, где произошла утечка топлива (белая стрелка на рис. 1), не видна.



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

Топливные баки на рис. 1 — сооружения цилиндрической формы диаметром 40 м с конусообразными крышами, расположенные на расстоянии 70 м друг от друга. Высота стенок баков составляет от 20 (баки №2-№4) до 30 м (бак №5). Уклон крыш баков 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 бака – зеркальное отражение. Вследствие этого отраженный крышей сигнал S не возвращается к радару. Боковая стенка бака образует с поверхностью промплощадки двугранный угол, проекция которого показана на рис. 2 плоским углом AOB , благодаря чему в результате двойного переотражения сигнал D возвращается к радару. Особенностью отражения радиосигнала элементами конструкции уголка является равенство длины пути для всех лучей, падающих на его грани и возвращающихся обратно к радару. При съёмке происходит переналожение всех таких лучей в элементе с дальностью, соответствующей вершине уголка O . Таким образом, несмотря на довольно детальное разрешение по дальности 2.3 м, стенка бака высокой 20 или 30 м выглядит на изображении яркой точечной целью. Мелкомасштабные смещения граней уголка (вертикальной — по горизонтали, а горизонтальной по вертикали) приводят к смещению положения вершины O и, соответственно, изменению расстояния до радара.

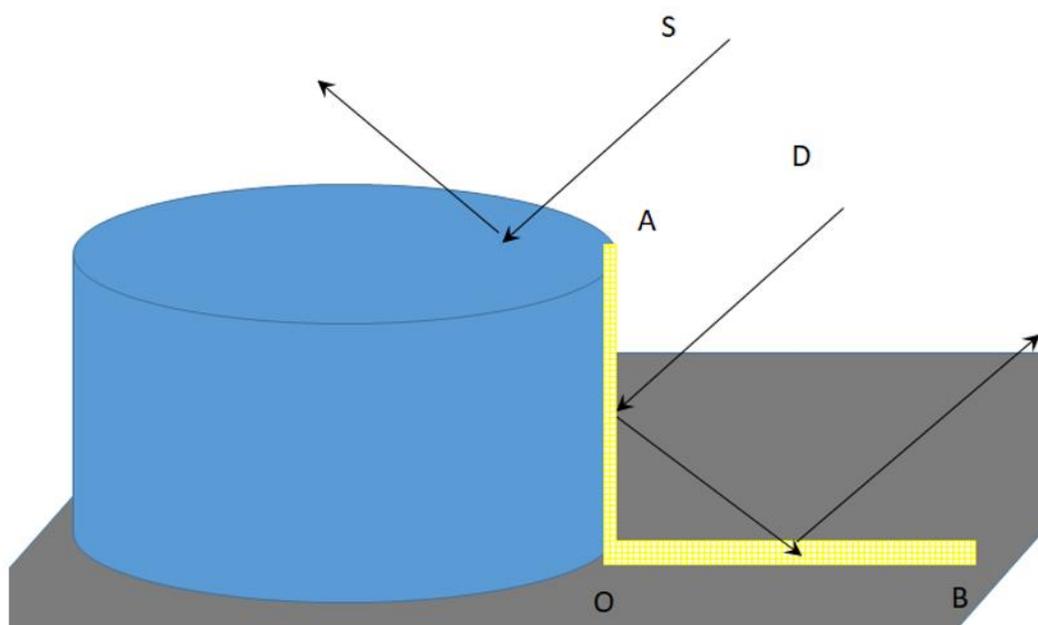


Рис. 2. Взаимодействие радиоволн с конструкцией бака

Цилиндрический объект на плоскости является классическим эталонным отражателем. Максимальное значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) такого отражателя в С-диапазоне соответствует зондированию под углом 45° и равно 59 дБм^2 для идеального цилиндра с размерами бака №2 [6]. Определим геометрические размеры эквивалентного ему по уровню отражения двугранного уголкового отражателя. Размер грани OB (желтая полоса на поверхности площадки) определяется эффективным размером зеркально отражающей части поверхности цилиндра, которая может быть аппроксимирована прямоугольной гранью AO , (вертикальная желтая полоса на рис. 2). Исходя из критерия предельного двустороннего набега длины волны $\lambda/4$ на краях полосы, ширина эквивалентной отражающей пластины для бака диаметром 40 м и высотой 20 м равна 0.53 м. Поскольку угол падения радиоволны θ близок к 45° (составляет около 41° на имеющихся снимках Sentinel-1B), длина обеих граней приблизительно равна высоте цилиндра. Таким образом, ЭПР двугранного уголкового отражателя с прямоугольными гранями 20 м \times 0.5 м равна теоретической ЭПР топливных баков ТЭЦ-3 с идеально гладкими проводящими поверхностями.

Влияние снежного покрова на отражение радиосигнала

Состояние реальной подстилающей поверхности, находящейся в пределах отражающей грани ОВ, является существенным для правильной интерпретации результатов фазовых измерений в радарной интерферометрии. Например, в результате увлажнения поверхности после дождя условия отражения сигнала вдоль линии ОВ могут меняться, что может быть причиной изменения уровня и направления отраженного сигнала, а также смещения положения вершины О двугранного уголка. Причиной изменения условий отражения зимой является образование снежного покрова на прилегающей к резервуару грани ОВ за время между съемками интерферометрической пары снимков. В работе [7] дана следующая простая связь между толщиной снежного покрова s на подстилающей поверхности и приращением длины пути Δl_s (а также разности фаз $\Delta\varphi_s$ на интерферограмме):

$$\Delta l_s = \frac{\lambda \Delta\varphi_s}{4\pi} = s(\cos \theta - \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2 \theta}), \quad (1)$$

где ε_s — диэлектрическая проницаемость снега.

В работе [8] на примере обработки сигналов, отраженных опорами линии электропередач на снежной равнине, показано, что, например, выпадение равномерного слоя свежего снега толщиной 4 см с плотностью снега 0.25 г/см^3 за время между съемками приводит к увеличению двусторонней электрической длины пути сигнала от радара до эффективного фазового центра отражения на величину порядка 1 см, что для радиоволн С-диапазона эквивалентно приращению фазы на 2 рад. Такого рода добавки фазы, возникающие после снегопада, могут быть неверно интерпретированы как смещения/просадки отражающей поверхности. Кроме того, неравномерный снежный или снежно-ледовый покров площадки вдоль грани ОВ может быть причиной не только ухудшения отражения гранью ОВ по сравнению с идеально ровной и чистой от снега, но и нарушения взаимной ортогональности граней и соответствующего снижения уровня отражения сигнала двугранным уголком в сторону радара.

На рис. 3 приведен график среднесуточной температуры воздуха и толщины снежного покрова на метеостанции Норильска в период с августа 2019 по август 2020 года по данным ресурса gr5.ru.

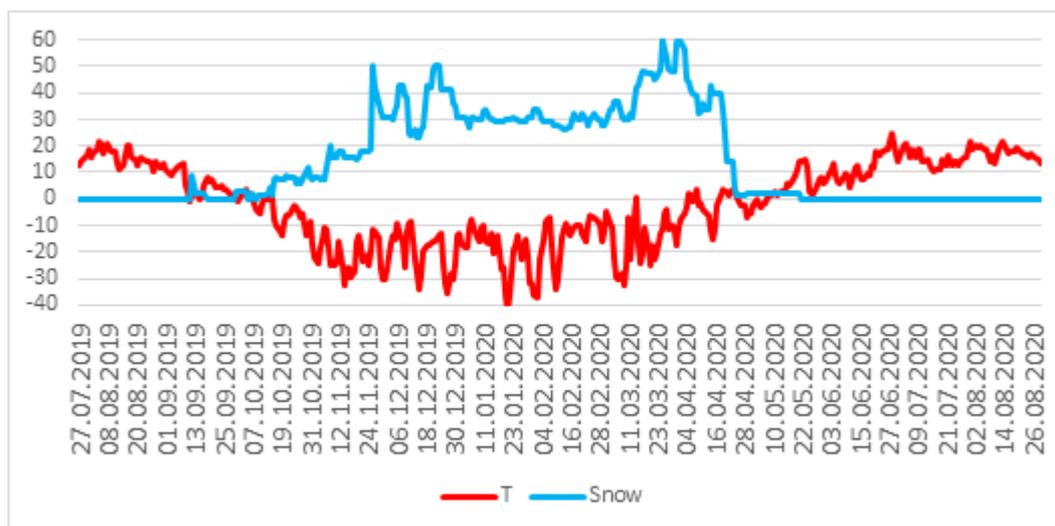


Рис. 3. Температура воздуха и толщина снежного покрова на метеостанции

Красная линия на рис. 3 — температура воздуха в градусах, синяя — толщина снежного покрова в сантиметрах. В начале сентября 2019 года температура воздуха начинает переходить через ноль, 13 сентября отмечено кратковременное похолодание и

первое выпадение снега. Стабильно отрицательные температуры и установление и накопление снежного покрова наблюдаются с середины октября. Начало снеготаяния в 2020 году относится к середине апреля, сход снега наблюдается в мае.

На рис. 4 показано изменение уровня ЭПР баков №2-№5 в течение того же временного интервала, что и на рис. 3. На горизонтальной оси указаны даты съемки. В целом, уровень ЭПР баков на 15-20 дБ ниже теоретического значения, что можно объяснить не идеальностью стенок баков и поверхности промплощадки, составляющих двугранный угол, а также низким уровнем бистатической удельной ЭПР (УЭПР) поверхности. Первое заметное снижение уровня отражения наблюдается в начале сентября, во время первого кратковременного похолодания и выпадения временного снежного покрова. Установление и накопление снежного покрова зимой не приводит к заметному изменению отражения всех баков, хотя флуктуации ЭПР слишком велики, чтобы можно было объяснить их изменением толщины снежного покрова на грани ОВ. Наиболее вероятной причиной является появление флуктуаций фазы вдоль грани ОВ из-за неоднородностей снежного слоя. В апреле, с началом снеготаяния, уровень отражения сигнала баками возрастает. Резкое падение сигнала с конца июля 2020 г. от бака 5, а затем и бака 4 объясняется их процессом их демонтажа.

Заметим, что, несмотря на несложную связь между приращением односторонней длины пути (или фазы) сигнала и приращением толщины снежного покрова за время между съемками (1), невозможно получить достаточно точные фазовые поправки, используя сведения о толщине снега по данным близлежащих наземных метеостанций. Вследствие локальных особенностей снегопада, переноса снега ветрами на открытых территориях, а также работ по расчистке/уборке снега в зоне съемки, о параметрах снежного покрова, накоплении снега зимой можно судить только качественно.

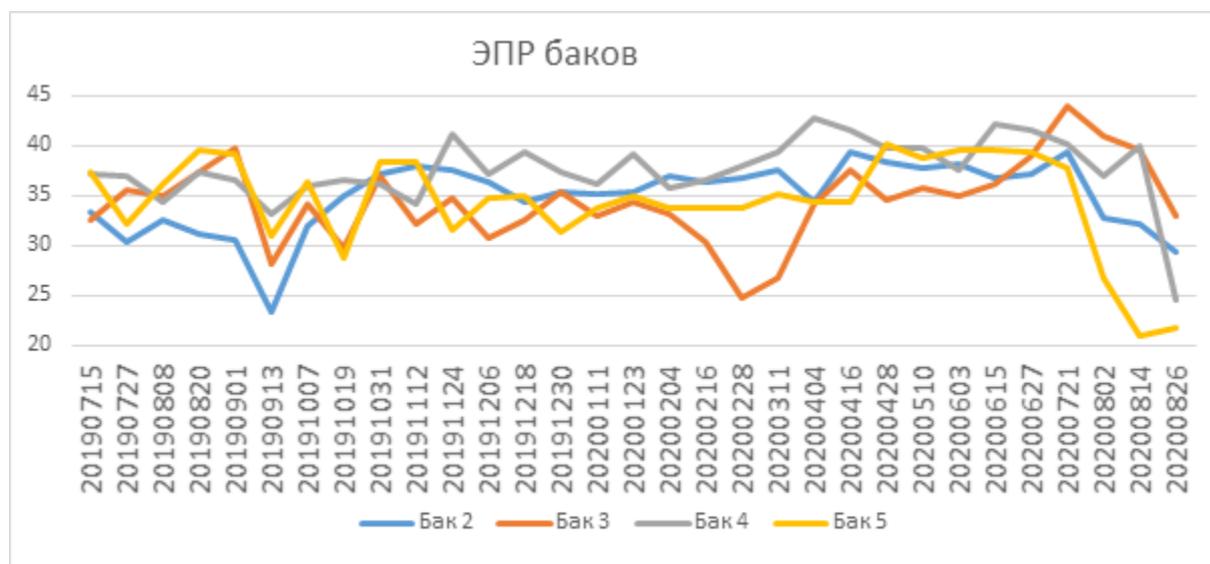


Рис. 4. ЭПР баков, дБм², в съемках 2019-2020 гг.

Кроме того, неоднородность снежного слоя вблизи бака, в пределах грани ОВ, может оказаться наиболее весомым фактором, сильно затрудняющим интерпретацию результатов измерений. На рис. 5 приведены оптические снимки третьего и четвертого топливных баков по данным Google Earth, сделанные летом (слева) и в начале весны (справа). На летнем снимке хорошо видны перегородки, разделяющие и ограничивающие участки вблизи топливных баков. Желтые полосы помечают положение горизонтальных граней двугранных уголков, отражающих сигналы в сторону радара. Характерной особенностью весеннего снимка является наличие

снежного покрова почти на всей территории. Доминирующие ветры южной четверти зимой являются обычной причиной переноса больших масс снега, выдувания снежного покрова на открытых участках и формирования глубоких сугробов вблизи неровностей рельефа. На правом рисунке красной стрелкой отмечены участки поверхности, где снежный покров вблизи баков сметается ветрами в зимнее время. Восточные (правые) части желтых полос находятся в заснеженной части. Удержанию и накоплению снега здесь способствуют разграничивающие бетонные перегородки.

Пусть бистатическая УЭПР поверхности промплощадки в пределах грани ОВ равна σ_0 , обозначим за s площадь всей грани, и пусть s_0 — площадь части грани, свободной от снега. Тогда фаза суммарного сигнала, отражающегося от поверхности промплощадки в пределах грани, может быть записана так:

$$\Delta\varphi_d = \text{Arg} \left(\sqrt{\sigma_0} \frac{s_0}{s} e^{j\varphi_0} + \sqrt{\sigma_0} \frac{1-s_0}{s} e^{j\varphi_s} \right). \quad (2)$$

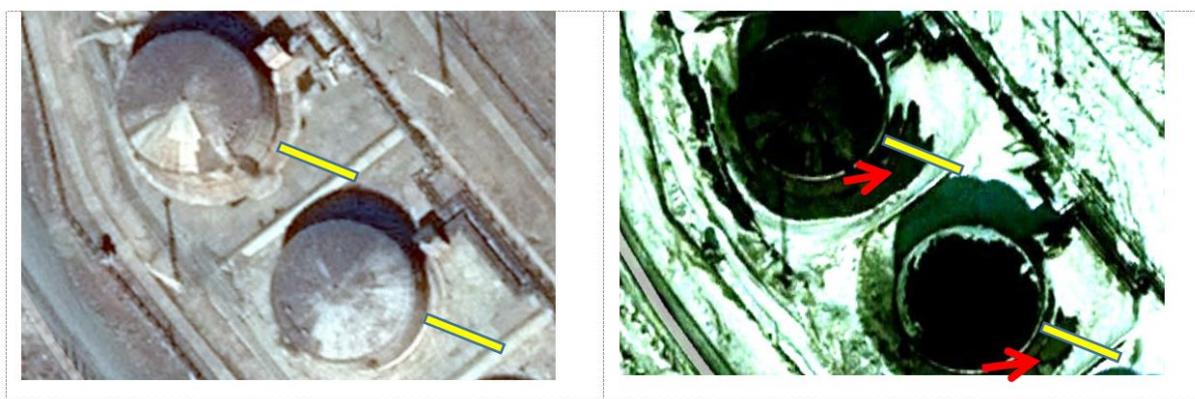


Рис. 5. Фрагменты летнего изображения баков (слева) и зимнего (справа)

В формуле (2) первое слагаемое в скобках — это сигнал бесснежного участка поверхности, второе — сигнал поверхности, покрытой слоем снега. Фаза φ_s характеризует влияние снежного слоя, фаза φ_0 — фаза отраженного площадкой сигнала. Фаза отраженного площадкой сигнала принята далее равной 0. На графике ниже показана зависимость фазы $\Delta\varphi_d$ суммарного эхо-сигнала площадки с различным процентным вкладом бесснежной поверхности в зависимости от вносимой снегом фазы φ_s . При полном покрытии грани снегом (вклад бесснежного участка 0%) измеренная фаза эхо-сигнала равна фазе, вносимой снежным слоем, что позволяет однозначно определить толщину ровного слоя снега по формуле (1) при условии раскрытия 2π неоднозначности измерений. С ростом площади бесснежного участка прямая зависимость нарушается. При 50% площади бесснежного участка фаза $\Delta\varphi_d$ меняется лишь в пределах ± 1.2 радиана, а при 75% — в пределах ± 0.4 радиан. В таких условиях корректное раскрытие 2π -неоднозначности, равно как и восстановление полной фазовой добавки, внесённой слоем снега, невозможно.

Для исследования долговременной динамики баков ТЭЦ-3 в период с сентября 2019 по июль 2020 г., предположительно охватывающий основные процессы смещения отражающих объектов, в том числе и аварийное событие 29 мая 2020 г., были построены дифференциальные интерферограммы с 12-дневными интервалами между съемками. Топографическая фаза была оценена по данным ЦМР GMTED2010 и устранена. Для оценки и коррекции неизвестной начальной фазы на интерферограмме был выбран в качестве опорного, предположительно стабильного объекта отражающей

поверхности, трехгранный уголок, образованный прямым углом административного здания и поверхностью промплощадки (находится в 1050 м в направлении восток-юго-восток от баков). Скорректированные измерения разностей фаз для каждого из баков были просуммированы с накоплением. Временной ход накопленной фазы для баков 2-5, начиная с 8 августа 2019 г., приведен на рис. 7. По горизонтали указана дата, на которую выполнено накопление фазы, по вертикали — фаза в радианах.

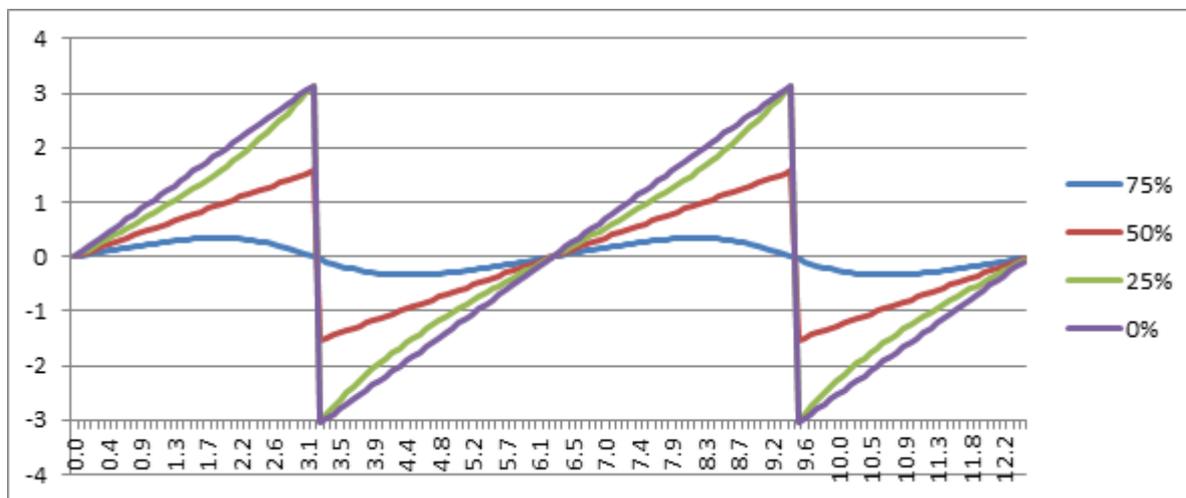


Рис. 6. Зависимость измеряемой фазы сигнала от фазы, обусловленной слоем снега

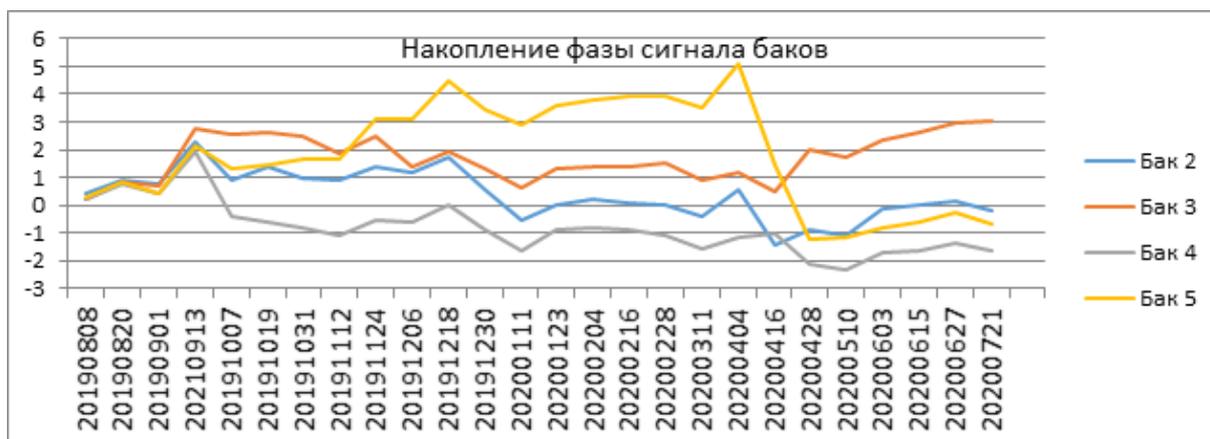


Рис. 7. Накопление фазы сигнала баков в период с августа 2019 по июль 2020 г.

Как видно на рис. 7, в течение августа 2019 г. фаза сигнала всех баков практически одинакова и близка к нулю. Первое резкое и одинаковое изменение фазы всех баков наблюдается 13 сентября, во время кратковременного похолодания и выпадения первого снега. В принятой схеме интерферометрической обработки такой рост фазы может быть неверно интерпретирован как просадка отражающей поверхности, если не принять во внимание закономерное увеличение фазы сигнала вследствие образования слоя снега. Далее в течение всей зимы отмечается рост рассогласования в величине фазы сигнала баков. Фаза сигнала бака №5 растет вплоть до начала снеготаяния в апреле 2020 г., после чего снижается практически до нуля после схода снежного покрова в мае, что без учёта влияния снега могло бы быть интерпретировано как монотонное проседание бака в течение зимы с возвратом в исходное положение весной. Значение фазы бака №4 снижается до -2 радиан, как если бы имело место его

перемещение вверх на 0.9 см. Фаза бака №3 нарастает до +3 рад (просадка на 1.3 см?), и колеблется около нуля у бака №2.

Одним из способов решения проблемы искажающего влияния снега может быть использование снимков, сделанных в бесснежное время года и желательно в сухую погоду. Для проверки этого подхода нами были выбраны три интерферометрические пары снимков, выполненных в летнее время года (с интервалом между съемками порядка 1 года). Условием отбора этих пар снимков было также отсутствие значимых осадков в день съемки, а также за несколько дней до съемки. Измеренные на сформированных интерферограммах разности фаз сигналов всех баков ТЭЦ-3 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Измерения фазы сигналов баков №2-5 на годовых интерферограммах

Даты съёмки	Бак №2	Бак №3	Бак №4	Бак №5
20170725-20180720	0.1 рад	0.1 рад	0.6 рад	0.5 рад
20180720-20190727	-0.9 рад	-0.7 рад	-1.2 рад	-0.9 рад
20190727-20200510	0.8 рад	-1.6 рад	-1.1 рад	0.4 рад

Исходя из сведений таблицы 1, можно говорить о довольно высокой стабильности положения отражающих центров топливных баков на годовых интервалах в 2017-2019 гг. Среднеквадратичное отклонение флуктуаций фазы на каждой интерферограмме находится в пределах 0.7-1 рад, что соответствует флуктуациям положения объектов в пределах 4.5 мм. Следовательно, разброс значений фазы для баков на рис. 7 в мае 2020 г. около 4 радиан обусловлен скорее накоплением фазовых отклонений, вызванных изменяющимся слоем снега в течение зимнего периода времени. Необходимо отметить поведение фазы сигнала аварийного бака №5 на годовом интервале времени, охватывающем зимнее время года. Нарастание фазы сигнала зимой, которое без учёта снегового покрова можно было бы интерпретировать как просадку бака перед аварийной разгерметизацией, скорее всего, объясняется нарастанием снежного покрова вблизи бака, в месте расположения нижней грани виртуального двугранного уголкового отражателя.

Выводы

Приведенные в статье результаты подчеркивают сложность интерпретации интерферометрических измерений при наличии снеговых осадков на подстилающей поверхности. Однако правильный подбор условий, при которых получены материалы для интерферометрической обработки, позволяет сделать более обоснованное 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, конечно же, не дает возможности выявлять возможные площадные смещения участков поверхности меньшего линейного размера, которые могли бы быть причиной повреждения резервуара №5 в мае 2020 года.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Митник Л.М. Мониторинг стабильности топливных резервуаров Норильской ТЭЦ-3 методами радарной интерферометрии//Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №5. С. 281–285.
5. Захаров А.И., Захарова Л.Н. Наблюдение динамики топливных резервуаров Норильской ТЭЦ-3 по данным РСА Sentinel-1// Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром-2021. Муром, 25-27 мая 2021 г. с. 158-163
6. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели/ М.: Сов.Радио. 1975. 248 с.
7. Guneriussen, T., Høgda, K. A., Johnsen, H., Lauknes, I. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens., 39(10), October 2001, pp. 2101–2108.
8. Захаров А.И., Захарова Л.Н. Наблюдения динамики снежного покрова на радарных интерферограммах L-диапазона// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 2017. Т. 14. №7. С. 190-197.