

# АПРОБАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ УГОЛКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПОЛИГОНАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДАРНЫХ СЪЕМОК

Булатова Л.И. ООО «Эридан»

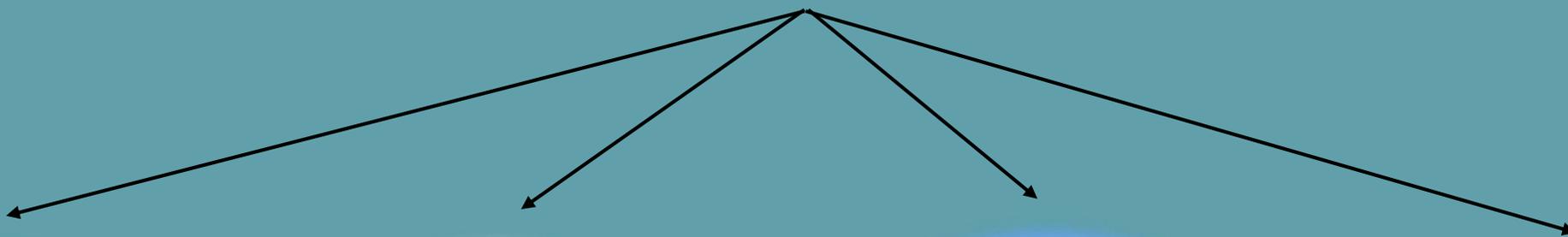
Гиладев Д.М. ПАО «Татнефть»

Назаров Р.Р. ООО «Эридан»

# Устойчивые отражатели в радарной интерферометрии

Возможность определения смещений земной поверхности методом радарной интерферометрии и их точность существенно зависят от пространственной и временной когерентности радиосигнала. Устойчивые отражатели – точки на радарном изображении, сохраняющие временную когерентность от снимка к снимку.

Примеры объектов, которые являются устойчивыми отражателями



Опоры ЛЭП



Скальные выступы



Объекты  
транспортной инфраструктуры

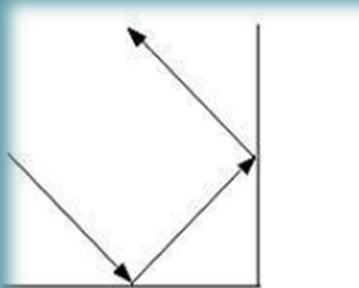


Крыши и стены  
зданий

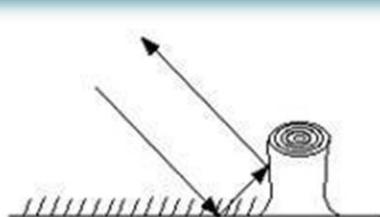
# Угловый отражатель (УО)

В незастроенных районах, где преобладает растительность или неоднородные участки земной поверхности, которые геометрически и диэлектрически нестабильны, радарная интерферометрия претерпевает сложности и результат интерферометрической обработки не позволит провести качественный анализ состояния земной поверхности.

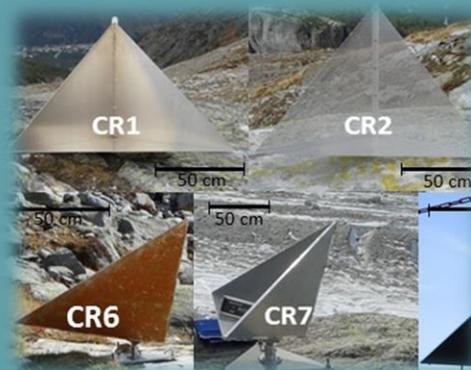
Угловый отражатель - устойчивая точечная цель, которая обеспечивает сильное обратное рассеивание. УО характеризуются более высокой отражающей способностью, чем окружающие устойчивые отражатели. Применение УО может решить проблему временной декорреляции на радарных снимках и устранить остаточную фазовую ошибку топографического компонента. А также минимизировать ошибку из-за атмосферных задержек за счет объединения отражателя с ГНСС-станцией. Угловый отражатель, представляет собой металлический прямоугольный тетраэдр с взаимно перпендикулярными отражающими гранями. Особенность такой конструкции – широкий диапазон углов падения.



Двойное отражение  
(угловый отражатель)



Отражение в природных  
условиях от двух гладких  
поверхностей



Угловый отражатель



УО с ГНСС-станцией

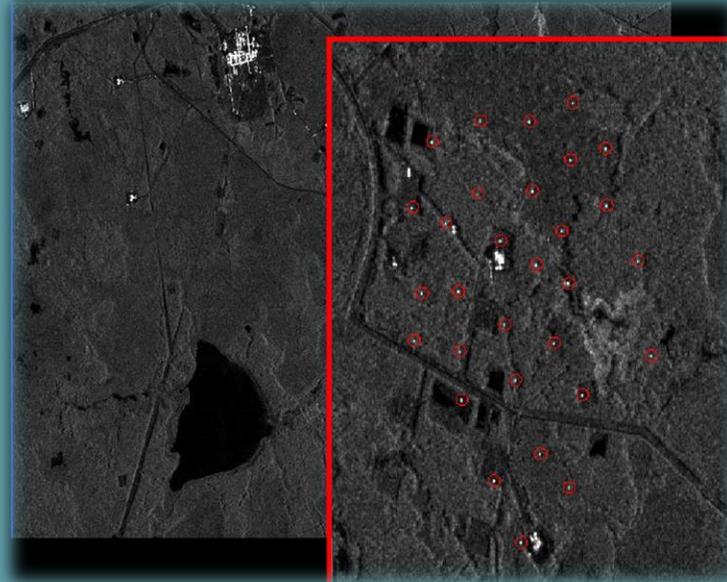
# Угловый отражатель (УО)

Международный опыт компании «MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd» (MDA, Канада) по установке и использованию угловых отражателей описывает данный метод мониторинга за поверхностью земли следующими преимуществами:

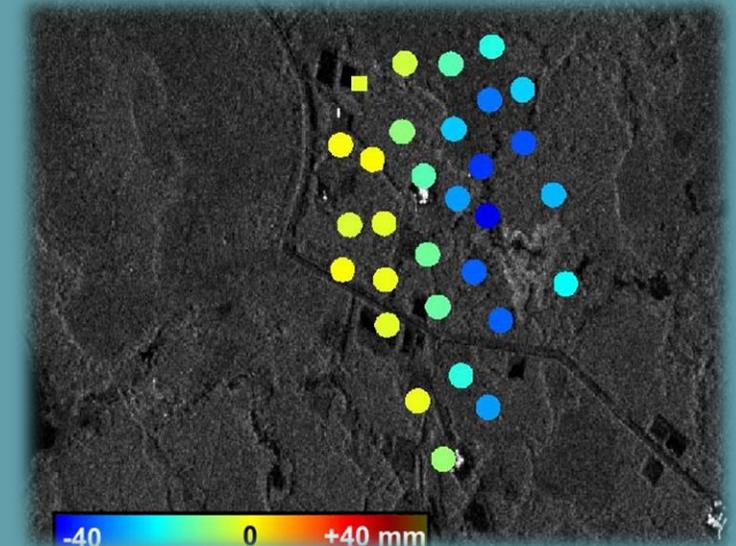
- непрерывность получения данных;
- отсутствие необходимости какого-либо сопровождения и обеспечения работ;
- высокая точность получаемых данных на значительных площадях;
- возможность решения ряда задач при привлечении данных о геологии, геомеханики;
- высокая экономическая эффективность.



Установка УО на месторождении битумной нефти. Провинция Альберта, Канада. Материалы компании MDA.



УО на радарном снимке. Провинция Альберта, Канада. Материалы компании MDA.



Смещения УО на месторождении битумной нефти. Провинция Альберта, Канада. Материалы компании MDA.

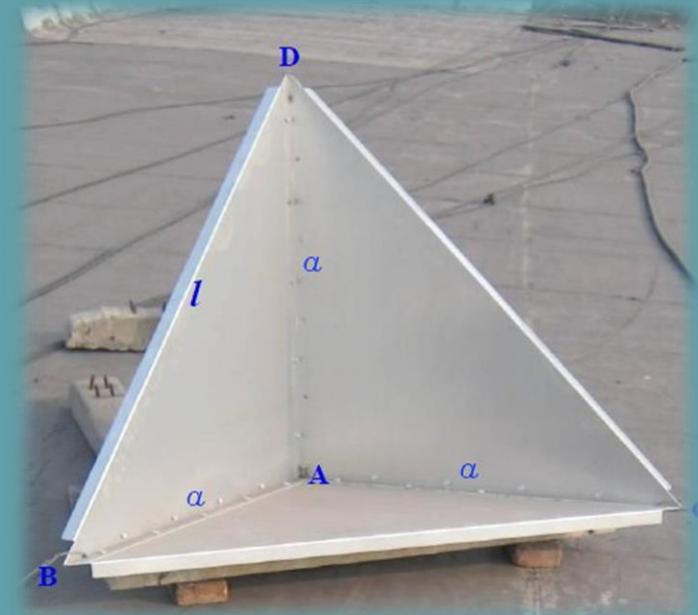
# Угловый отражатель (УО)

Эффективная площадь рассеяния – это площадь поверхности фиктивного идеального изотропного отражателя, который, будучи помещенным в точку расположения цели нормально к направлению облучения, создает в точке расположения ту же плотность потока мощности, что и реальная радиолокационная цель. Данная характеристика конкретного УО зависит от его формы, размеров, материала и ориентации по отношению к падающей волне. Для некоторых простейших конструкций получены аналитические оценки ЭПР, пригодные для использования на этапе проектирования реального углового отражателя.

Конструкция углового отражателя разрабатывалась так, чтобы его можно было идентифицировать на снимках спутников с радаром С-диапазона излучения (Sentinel-1(A, B) с длиной волны 5.6 см). Исходя из анализа ряда публикаций, параметр  $a$  (длина ребра грани прямоугольного тетраэдра) был определен длиной 1.0 м.

$$\sigma = \frac{4\pi}{3\lambda^2} a^4$$

Формула для оценки значения ЭПР прямоугольного тетраэдра



Угловый отражатель

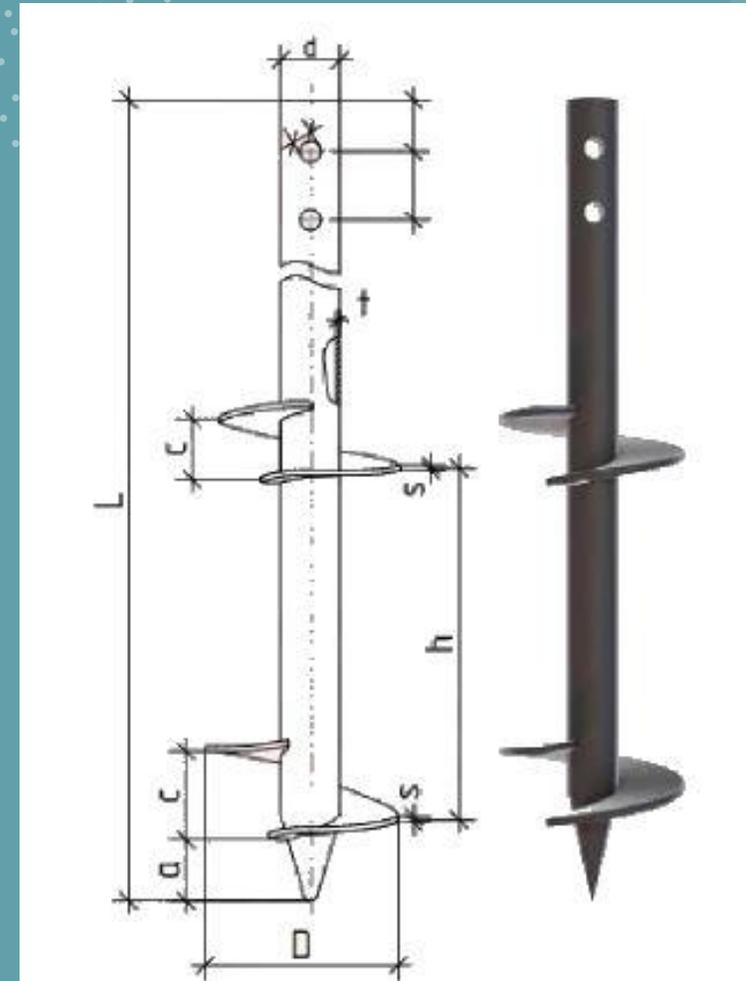
# Угловый отражатель (УО)

В соответствии с ГКИНП-07-016-91 «Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей» (п.2.3) глубина закладки определяется формулой:

$$\Gamma_з = \Gamma_п + 50 \text{ см}$$

где  $\Gamma_з$  — глубина закладки в см,  $\Gamma_п$  — глубина сезонного промерзания в см.

Исходя из того, что глубина сезонного промерзания грунта на территории деятельности ПАО «Татнефть» лежит в пределах 1,4 м - 1,8 м, то соответствующая глубина закладки несущего опорного столба УО составляет не менее 2,3 м. С учетом наземной части, высота которой должна быть не менее 0,5 м, полная длина несущего опорного столба УО ( $L$ ) должна составлять порядка 3,0 м. Оптимальным вариантом в этом случае может считаться использование в качестве несущего опорного столба УО винтовой сваи соответствующей длины. Параметры подобного несущего опорного столба УО представлены на рисунке, наличие лопастей обеспечивает дополнительную стабильность опоры в грунте.



$L=3000$  мм,  $d=159$  мм,  $h=600$  мм  
Опорный столб

# Угловой отражатель (УО)

Узел установки и крепления УО к опорному несущему столбу должен обеспечивать устойчивость УО и возможность ориентирования УО в направлении спутника. Схема крепления УО к опорному несущему столбу представлена на рисунке.

Для определения соответствия данной конструкции УО для решения задач мониторинга методом спутниковой радарной интерферометрии необходимо провести следующие исследования:

1. сбор и анализ данных подтверждающих эффективность использования УО данной конструкции для получения устойчивого отражения спутникового сигнала;
2. наблюдения за стабильностью конструкции УО, особенно в части противодействия вертикальным подвижкам грунта вызванным сезонным пучением грунтов.



Размещение УО на несущем столбе

# Угловой отражатель (УО)

Ориентация УО определяется 2-мя параметрами: азимут направления на спутник и углом облучения радаром спутника поверхности. При этом необходимо учитывать направление максимального излучения УО.

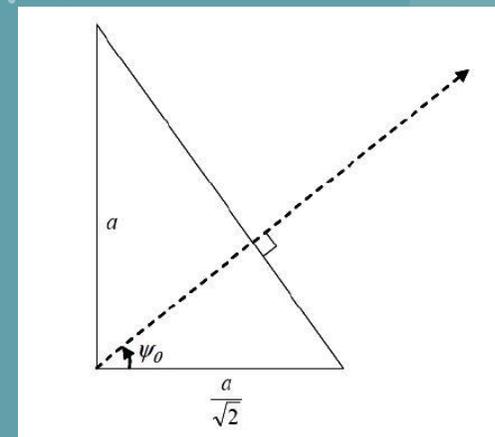
Для УО в форме прямоугольного тетраэдра  $\psi_0$  — направление максимального излучения вычисляется по следующей формуле:

$$\psi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \approx 35.3^\circ$$

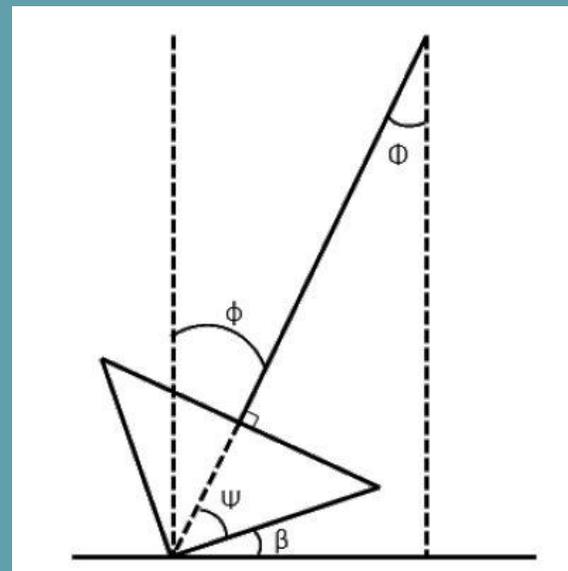
Угол наклона УО относительно плоскости горизонта определяется следующим образом.

Для радара спутников Sentinel-1A,B угол облучения радаром поверхности  $\Phi=35^\circ$ , тогда исходя из рис.16 угол наклона УО относительно плоскости горизонта  $\beta=19.7^\circ$ .

Ориентация и выставка УО по рассчитанным углам выполняется с точностью  $\pm 1^\circ$ .



$\psi_0$  - направление максимального излучения УО (боковая проекция)



$\beta$  - угол наклона УО (боковая проекция)  
 $\Phi$  - угол облучения радаром поверхности

# Угловый отражатель (УО)

Для предварительного исследования отражательной способности углового отражателя, был спроектирован и изготовлен прототип УО в форме прямоугольного тетраэдра.

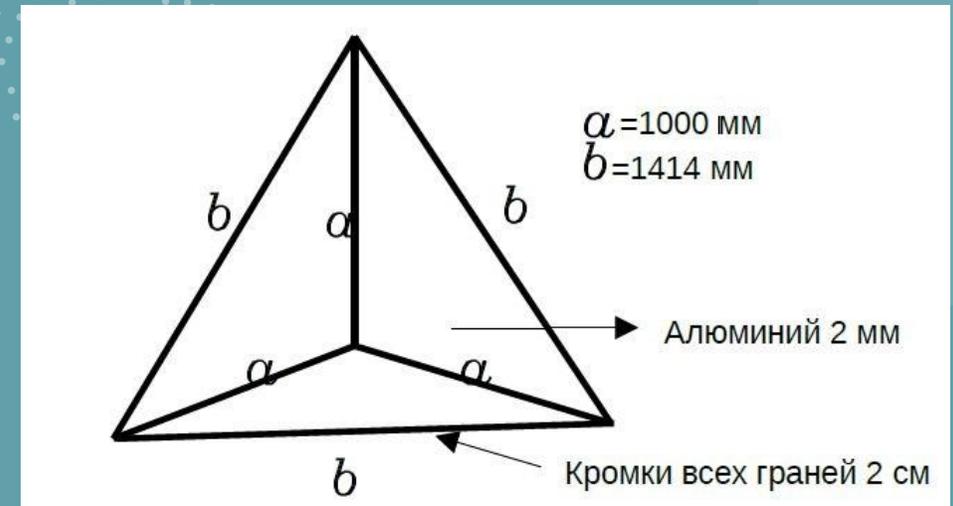
В ноябре 2021 года, изготовленный прототип УО был установлен на охраняемой территории. При этом, была обеспечена регулярная очистка УО от осадков в период наблюдений. УО был установлен на металлические опоры в необходимой ориентации.



Готовый прототип УО



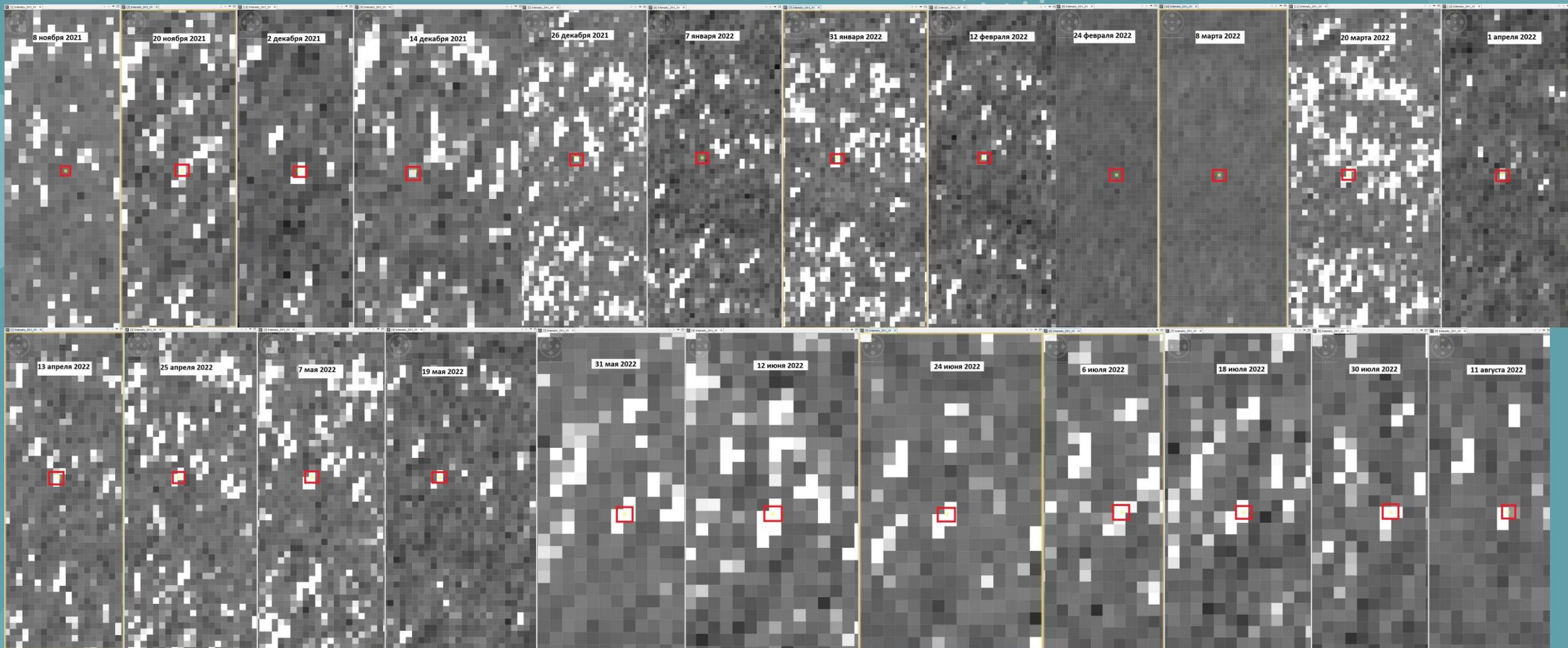
Установленный прототип УО



Чертеж УО. Все грани – прямоугольные равнобедренные треугольники. Взаимная перпендикулярность граней с точностью  $\pm 1^\circ$ .

# Угловый отражатель (УО)

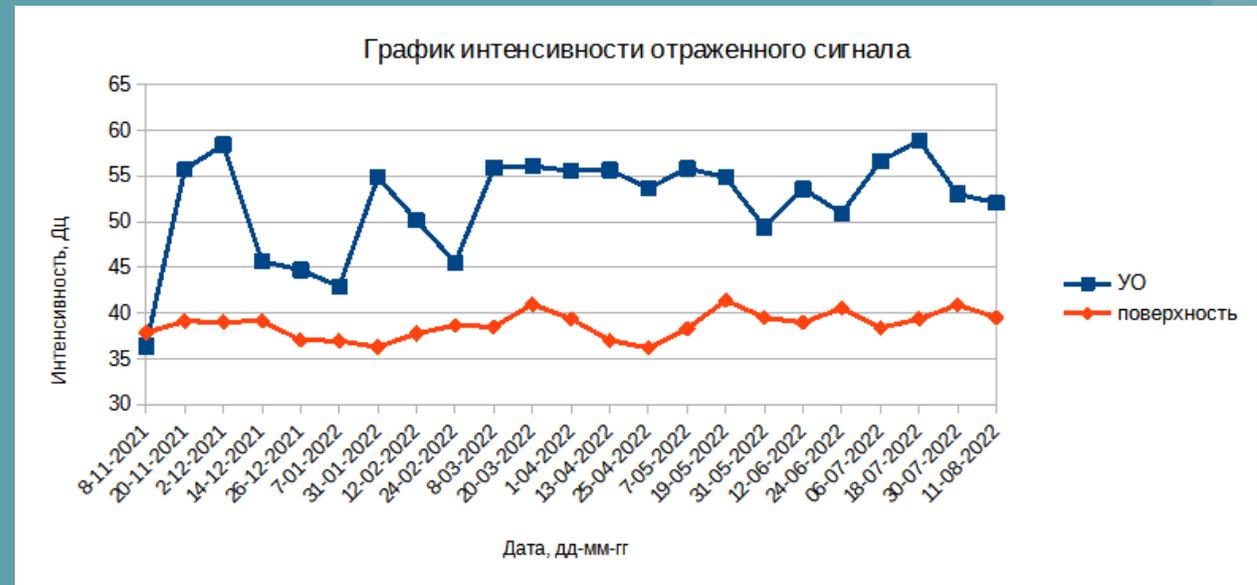
Для исследования отражающей способности УО были получены 23 радарных изображений (спутник Sentinel-1A). На рисунках представлены в режиме интенсивности сигнала. На них выполнялась идентификация углового отражателя.



# Угловый отражатель (УО)

В ПО SNAP, которое разработано Европейским Космическим Агентством (ESA) для работы с различными данными программы Copernicus, получены значения интенсивности отражения УО и подстилающей поверхности. Эти данные представлены в таблице и на графике.

Даты съемки	Интенсивность отр. УО, dbm <sup>2</sup>	Интенсивность отр. Поверх., dbm <sup>2</sup>
08.11.21	36	38
20.11.21	56	39
02.12.21	58	39
14.12.21	46	39
26.12.21	45	37
07.01.22	43	37
31.01.22	55	36
12.02.22	50	38
24.02.22	46	39
08.03.22	56	38
20.03.22	56	41
01.04.22	56	39
13.04.22	56	37
25.04.22	54	36
07.05.22	56	38
19.05.22	55	41
31.05.22	49	39
12.06.22	54	39
24.06.22	51	41
06.07.22	57	38
18.07.22	59	39
30.07.22	53	41
11.08.22	52	40



Значение интенсивности 08.11.21 совпадают, так как изображение в этот день получено ранее, чем была закончена установка УО. Значительные падения интенсивности отражения на даты 14.12.21, 26.12.21, 07.01.22, 24.02.22 связано со значительными осадками в эти даты, что подтверждает необходимость защиты УО от осадков.

# Заключение

В ходе данной работы нами была определена конструкция уголкового отражателя его основными характеристиками являются форма, размер, материал, ориентация по отношению к падающей волне. Значительное превышение интенсивности отражения УО над интенсивностью отражения от подстилающей поверхности позволяет с уверенностью утверждать, что установленный прототип УО выполняет свою функцию и явно распознается на радарных снимках.

При выборе места размещения УО следует учитывать следующие факторы:

- геологические условия на территории мониторинга;
- расположение существующих пунктов геодинимических полигонов ;
- расположение уголкового отражателя в местах производственных объектов;
- размещение на территориях с ограниченным доступом;
- учет расстояния от объектов, которые могут также давать устойчивые отражения .

Для повышения точности и достоверности получаемых данных о смещениях земной поверхности на территории деятельности ПАО «Татнефть» методом спутниковой радарной интерферометрии планируется размещение сети уголкового отражателей.

**Спасибо за внимание!**