



**Интерферометрический мониторинг
состояния оползневого цирка на р. Бурее
в 2019 году
по радиолокационным данным
С-диапазона**

Захаров А.И., Захарова Л.Н.

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

11 декабря 2018 г.

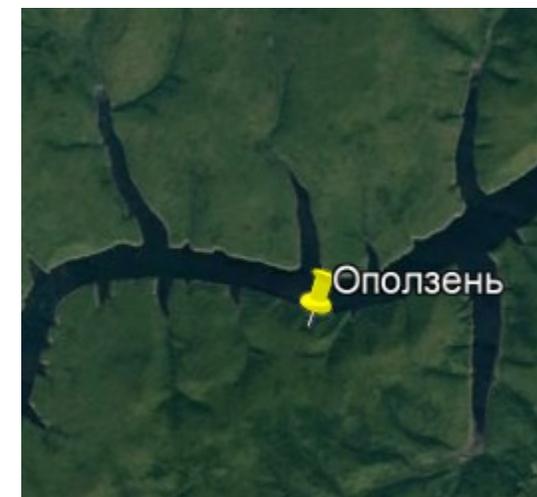
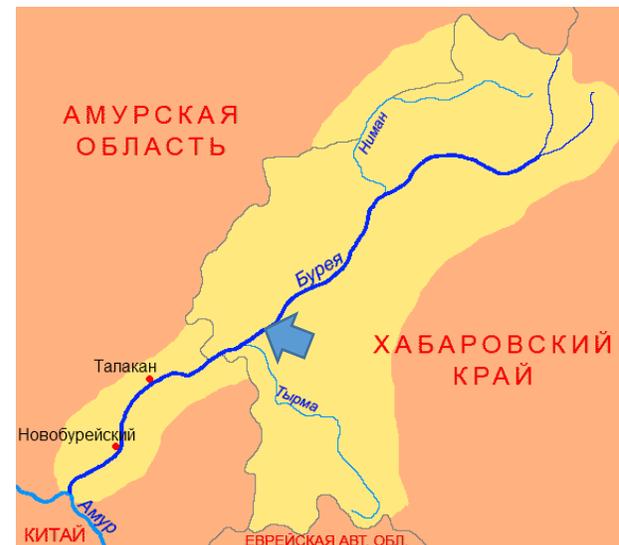
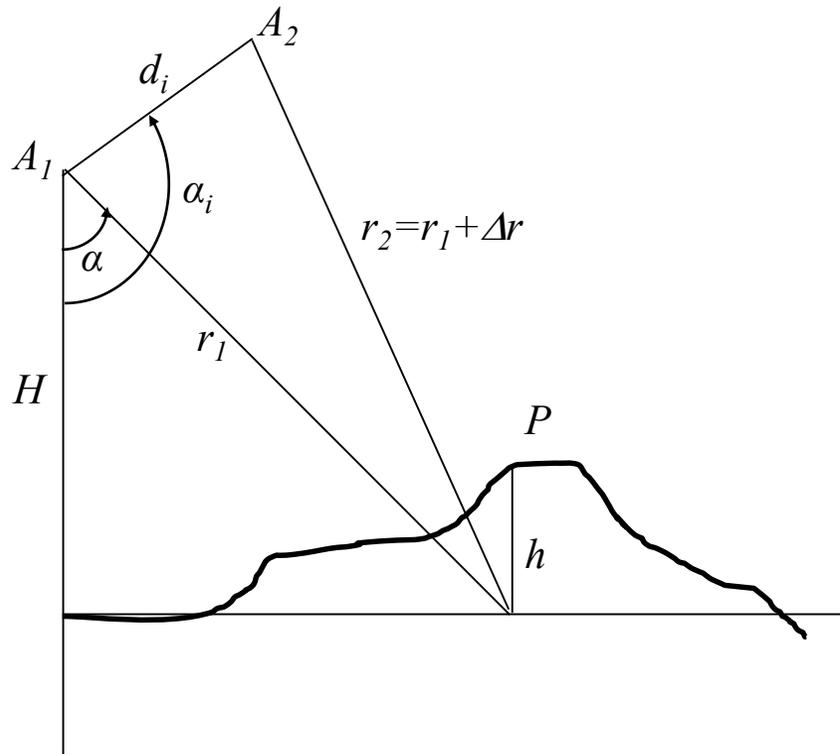




Схема интерферометрической съёмки



Интерферограмма

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

Разность фаз

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_d = -\frac{4\pi d_p \Delta h}{\lambda r \sin \alpha} - \frac{4\pi \delta r_d}{\lambda}$$

База интерферометра

$$d_p = d_i \sin(\alpha_i - \alpha)$$



Данные Sentinel-1

Режим съёмки: Interferometric Wide mode

Частота: 5.405 ГГц (5.6 см)

Высота орбиты: 700 км

Период повторной съёмки: 12 дней

Угол обзора:

Трасса 134: 42°

Трасса 61: 32°



Пары с 12-дневным интервалом их базы d_p

20181205-20181217	-150.94	20181128-20181210	60.977
20181217-20181229	8.031	20181210-20181222	82.747
20181229-20190110	50.778	20181222-20190103	-69.303
20190110-20190122	16.283	20190103-20190115	-89.859
20190122-20190203	81.275	20190115-20190127	40.097
20190203-20190215	-148.894	20190127-20190208	49.624
20190215-20190227	9.119	20190208-20190220	38.727
20190227-20190311	-30.034	20190220-20190304	-11.725
20190311-20190323	21.165	20190304-20190316	-135.643
20190323-20190404	100.807	20190316-20190328	-14.332
20190404-20190416	-19.828	20190328-20190409	46.423
20190416-20190428	-61.519	20190409-20190421	47.385
20190428-20190510	-127.073	20190421-20190503	82.139
20190510-20190522	140.723	20190503-20190515	-89.611
20190522-20190603	21.852	20190515-20190527	-13.504
20190603-20190615	14.217	20190527-20190608	-87.515
20190615-20190627	-79.612	20190608-20190620	80.845
20190627-20190709	14.749	20190620-20190702	87.792
20190709-20190721	-15.053	20190702-20190714	-46.636
20190721-20190802	21.75	20190714-20190726	-90.44
20190802-20190814	15.473	20190726-20190807	-15.17
20190814-20190826	-43.029	20190807-20190819	77.811
20190826-20190907	9.416	20190819-20190831	14.106
20190907-20190919	18.131	20190831-20190912	-10.537
20190919-20191001	59.15	20190912-20190924	1.882
20191001-20191013	-16.854	20190924-20191006	-64.254
20191013-20191025	-17.305	20191006-20191018	55.272
20191025-20191106	-28.67	20191018-20191030	-14.323

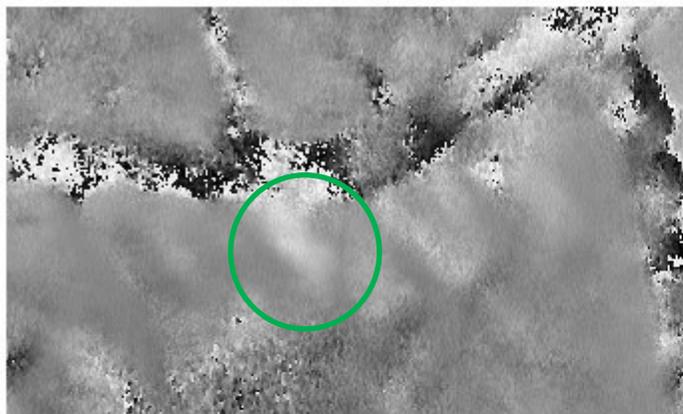
Трасса 61

Трасса 134

Ситуация до обрушения (2016-2018 годы)

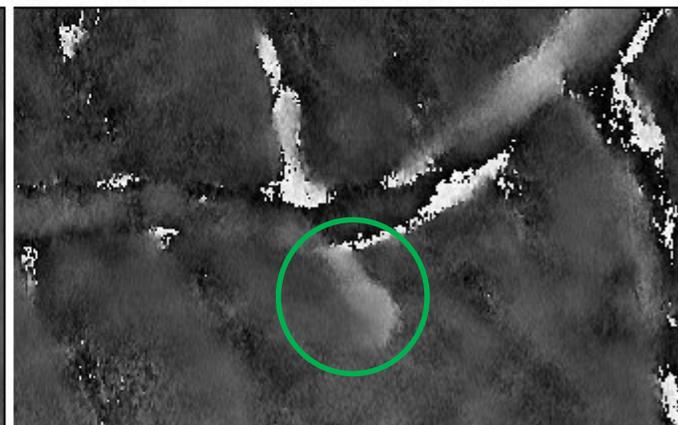
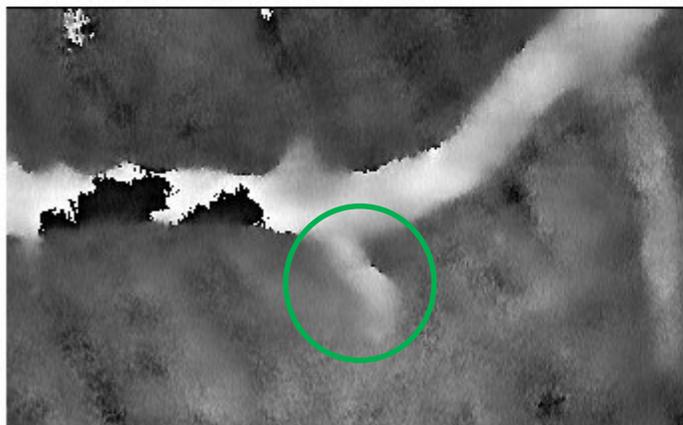
Интерферограммы и величины максимального радиального смещения
на оползневом склоне (ЦМР SRTM)

20161215-
20161227
6 мм



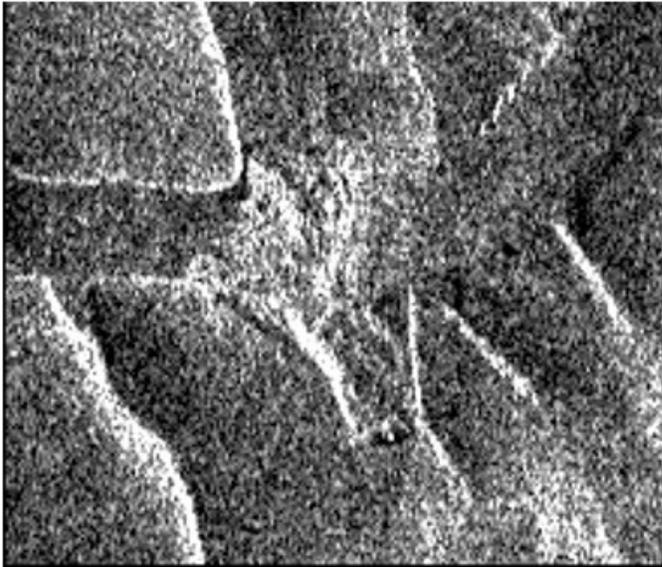
20170101-
20170113
9 мм

20180201-
20180213
13 мм

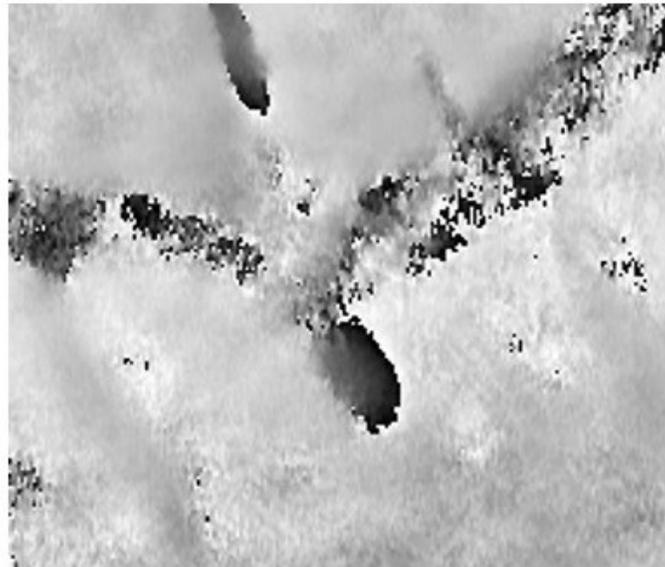


20180225-
20180309
10 мм

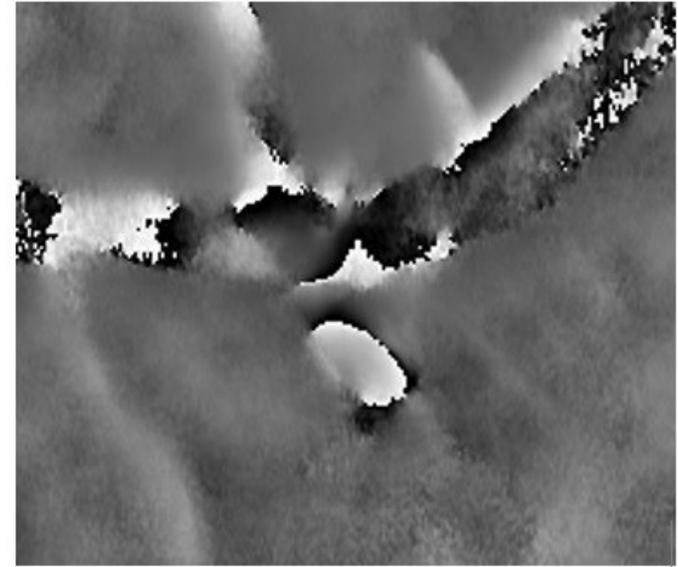
Влияние базы интерферометра



Амплитудное изображение
20190127

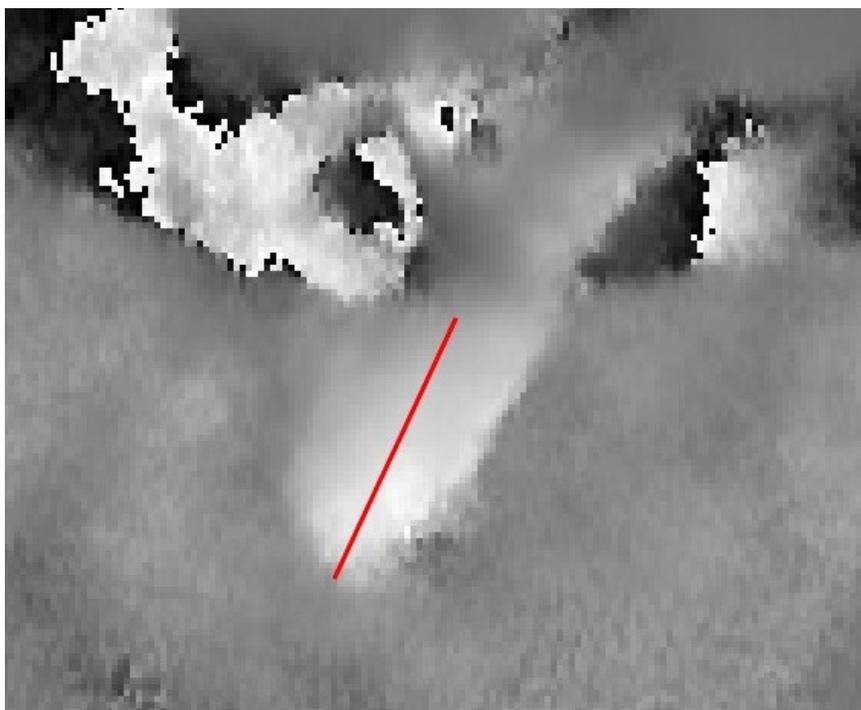


Интерферограмма
с $B_{\perp} = +49$ м
20190127-20190208

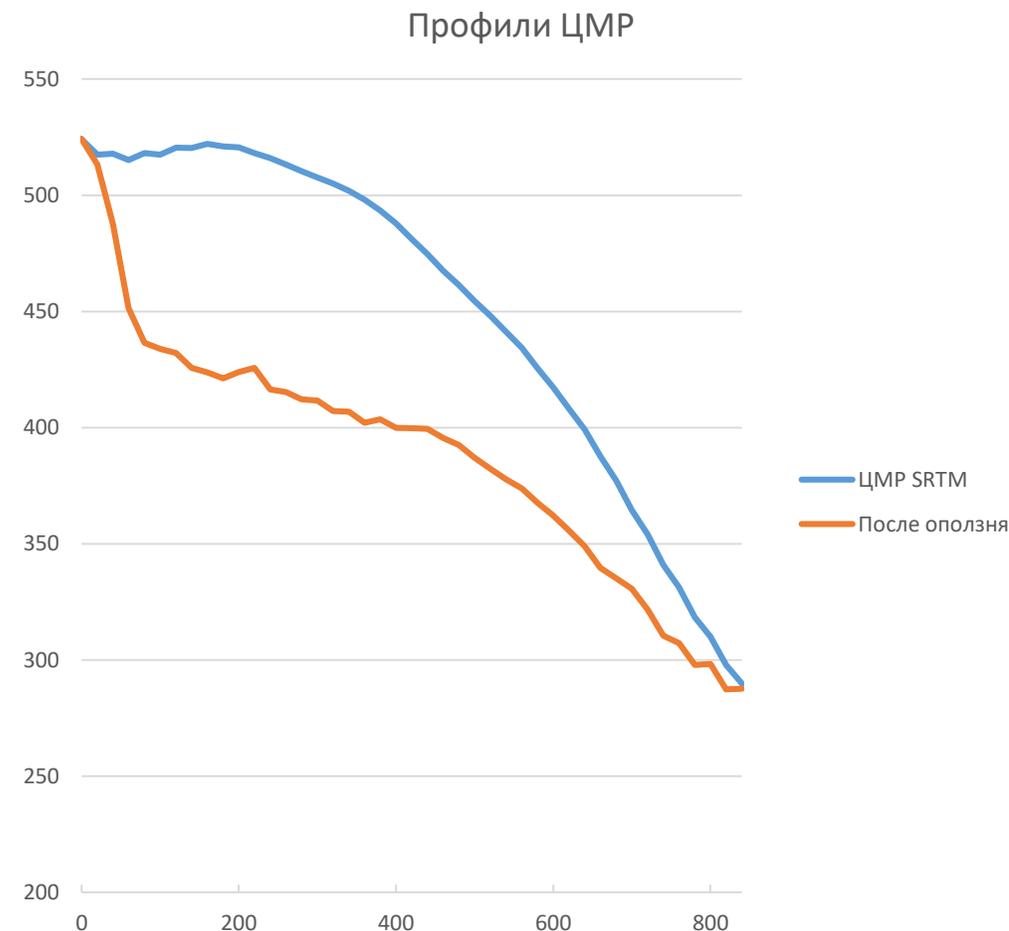


Интерферограмма
с $B_{\perp} = -89$ м
20190103-20190115

Оценка изменений в рельефе поверхности по интерферограмме



Интерферограмма 29.12.2019-10.01.2019

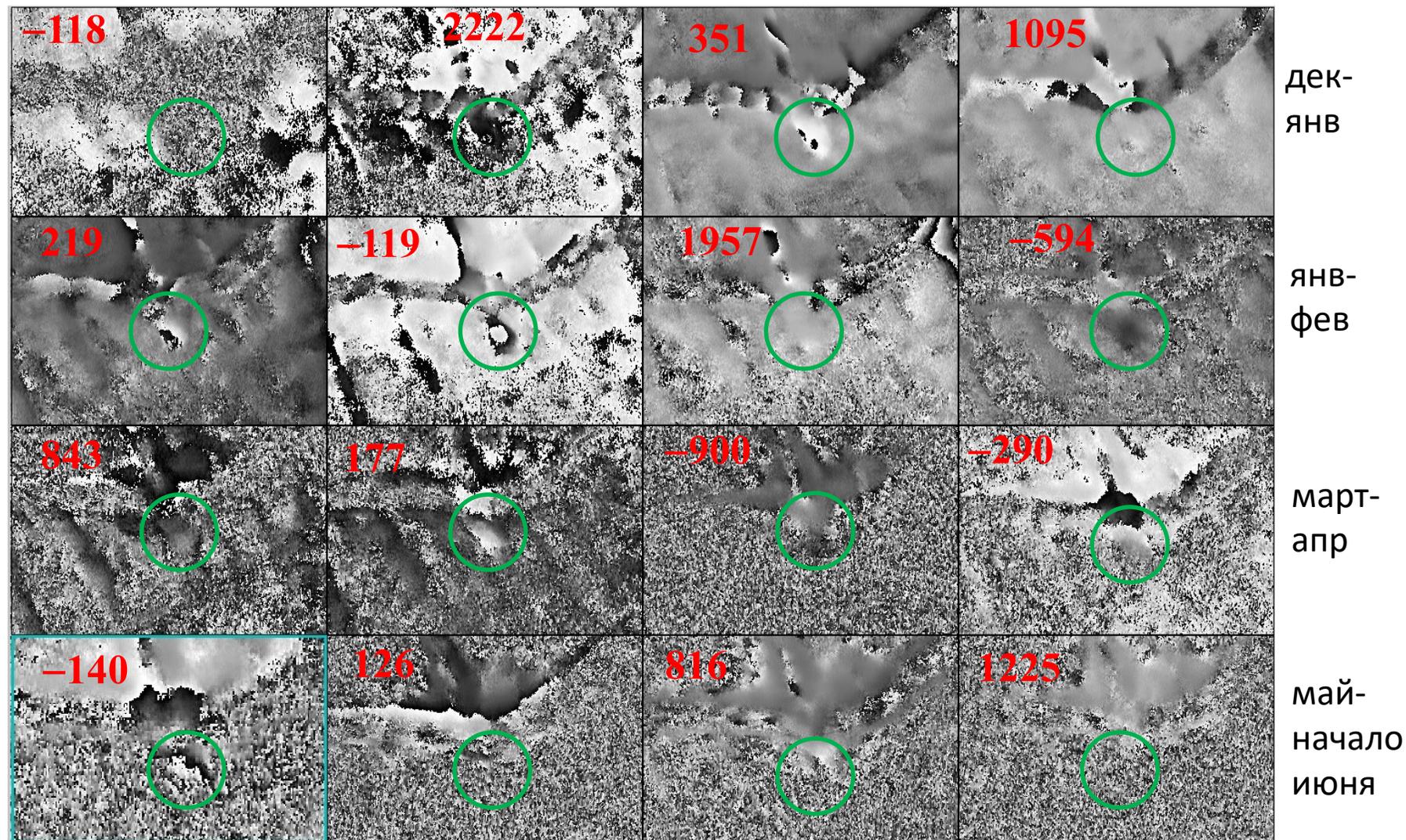


Интерферограммы зима-весна

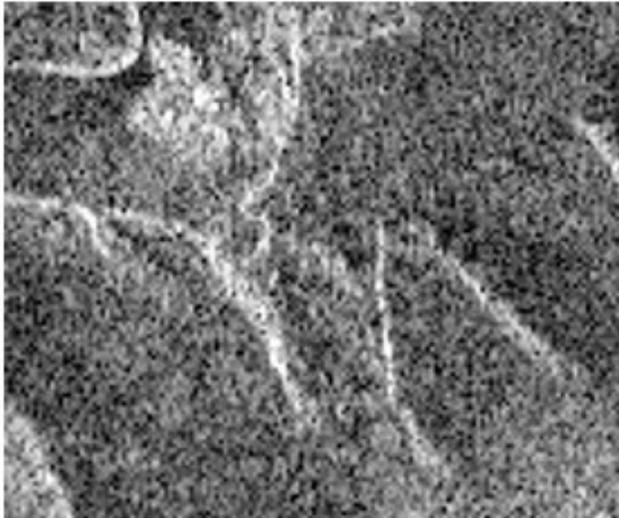
Высота
неоднозначности:

$$h_{amb} = \frac{\lambda r \sin \alpha}{2d_p}$$

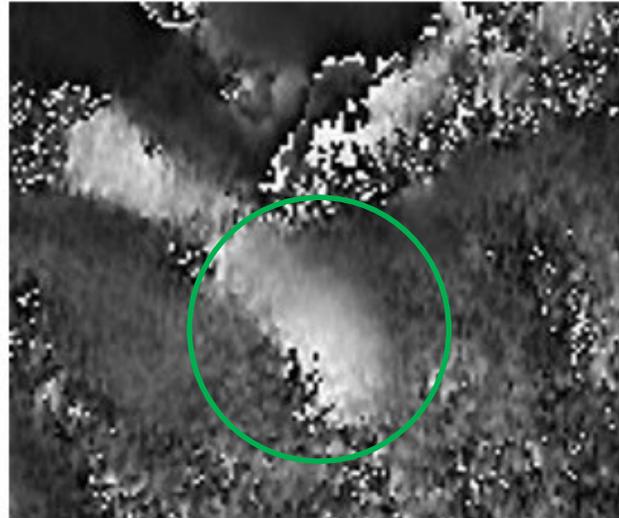
λ – длина волны
 r – наклонная дальность
 α – угол обзора
 d_p – перпендикулярная составляющая базы интерферометра



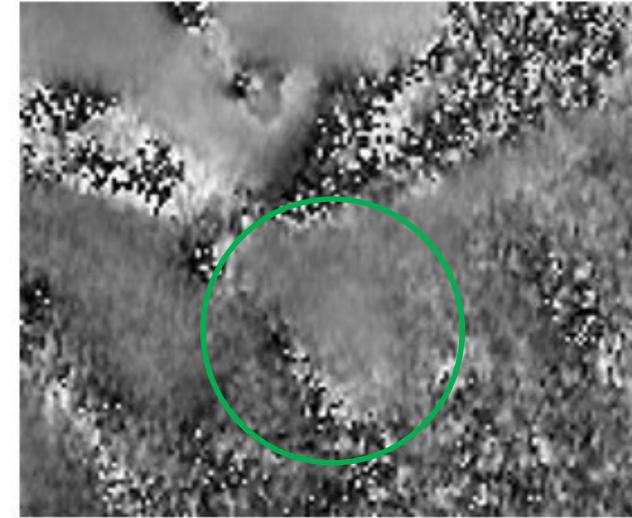
Коррекция интерферометрической фазы



Амплитудное изображение
20190115



Интерферограмма с $B_{\perp} = 40$ м
20190115-20190127
до коррекции фазы



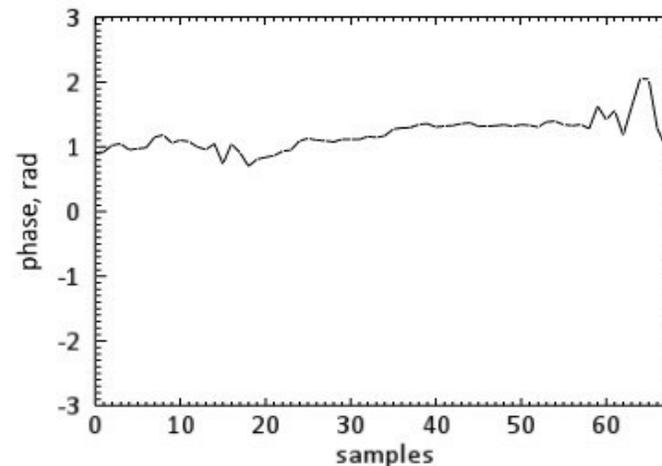
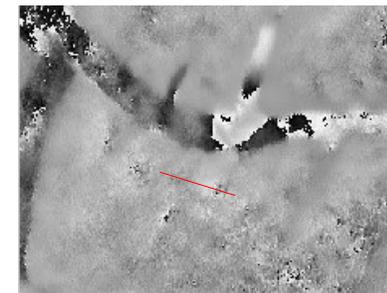
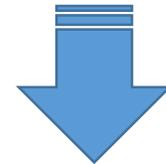
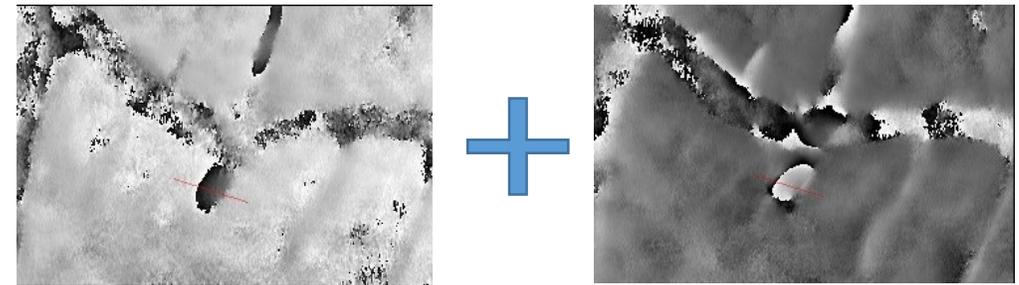
Интерферограмма с $B_{\perp} = 40$ м
20190115-20190127
после коррекции фазы

Оценка точности смещений: метод малых баз и метод сложения

$$\Delta\phi_{12} = \Delta\phi_{t(12)} + \Delta\phi_{d(12)} = -\frac{4\pi d_{p(12)}\Delta h}{\lambda r \sin \alpha} - \frac{4\pi\delta r_{d(12)}}{\lambda}$$

$$d_p(12) = -d_p(34)$$

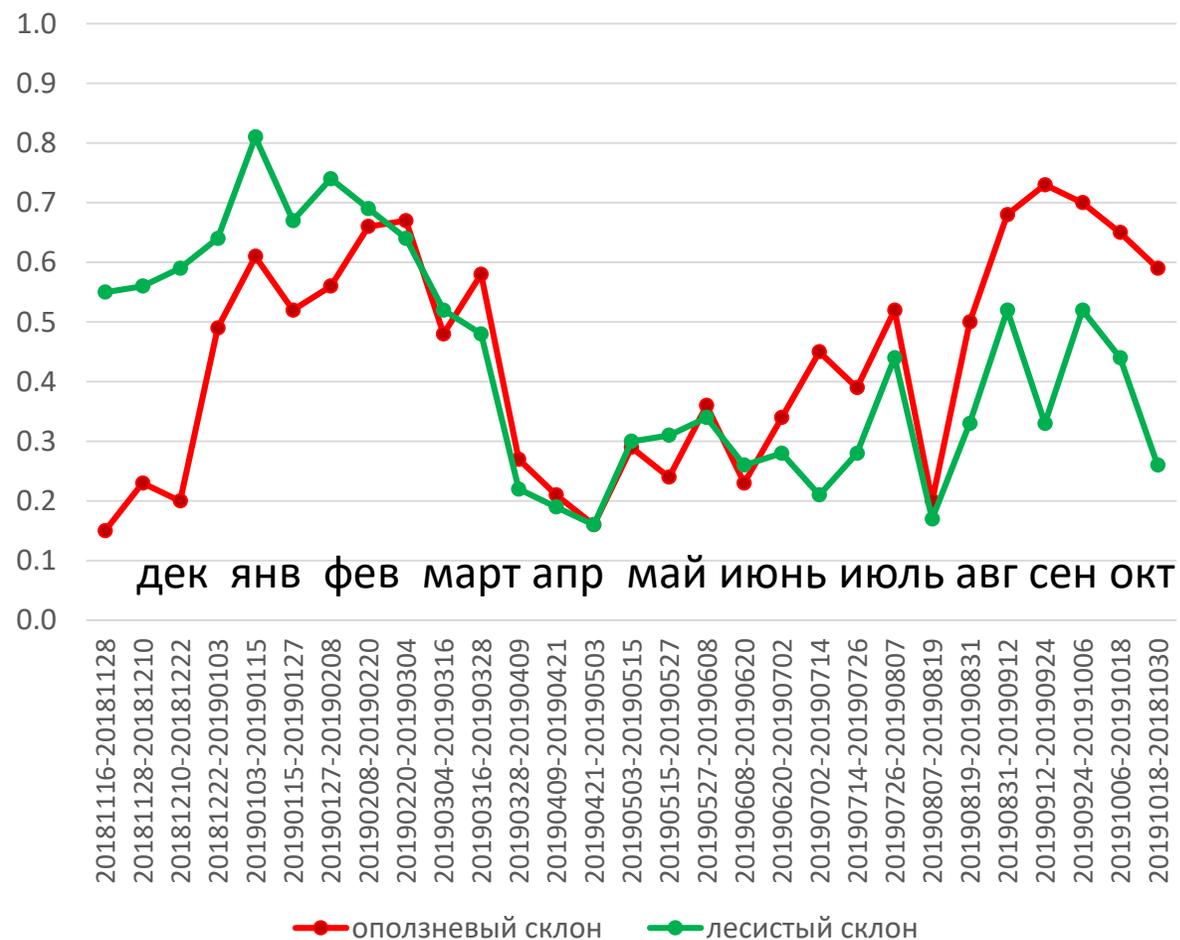
$$\Delta\phi_{34} = \Delta\phi_{t(34)} + \Delta\phi_{d(34)} = -\frac{4\pi d_{p(34)}\Delta h}{\lambda r \sin \alpha} - \frac{4\pi\delta r_{d(34)}}{\lambda}$$



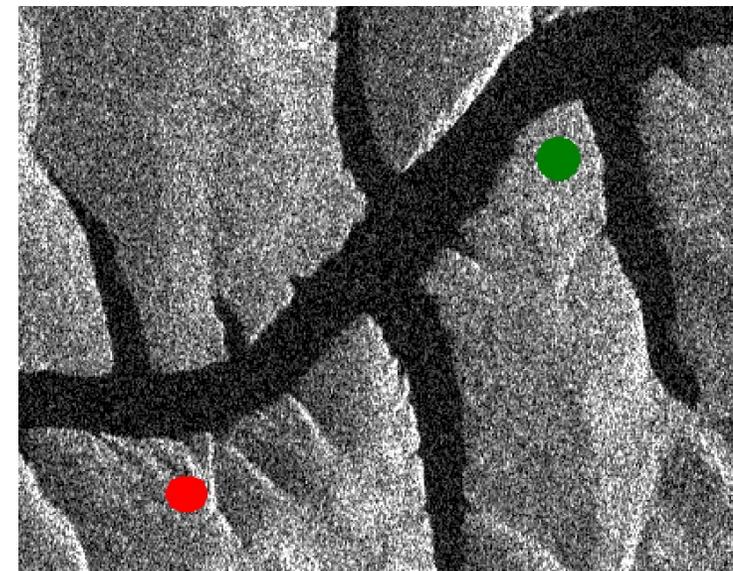
Колебания фазы на дифференциальных интерферограммах и на интерферограммах с малой базой интерферометра в пределах 0.5 радиан соответствуют возможным смещениям на 2 мм, что свидетельствует о стабильности оползневого склона после схода грунта.

Интерферометрическая когерентность

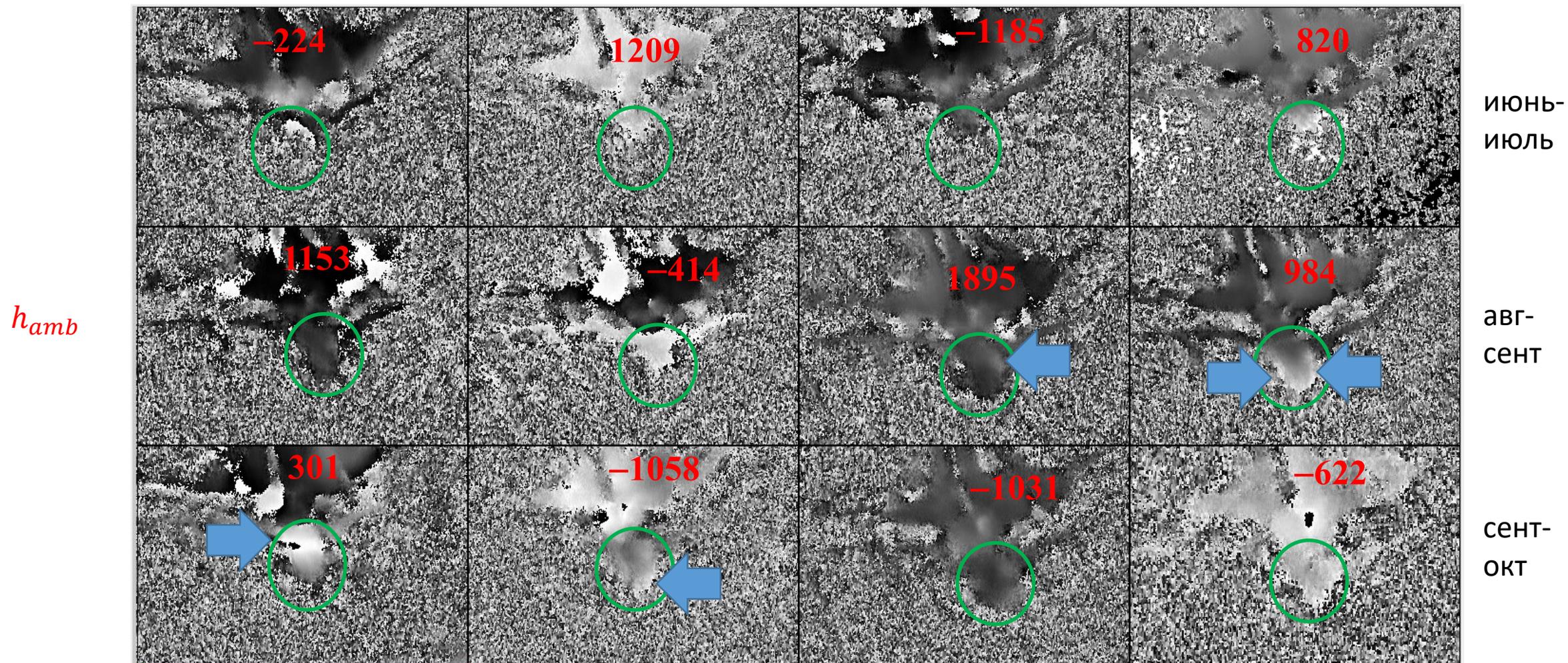
Когерентность с ноября 2018 г. по октябрь 2019 г.



$$\gamma = \frac{E\{U_1 \cdot U_2^*\}}{\sqrt{E\{|U_1|^2\}E\{|U_2|^2\}}}$$

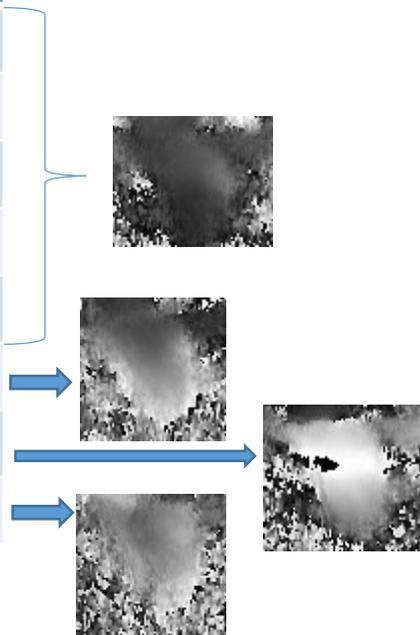


Интерферограммы лето-осень



Радиальные смещения в июле-октябре

Даты	Максимальное радиальное смещение за 12 дней	Положение максимального смещения
09.07.2019-21.07.2019	0,5 см	Восточный край, середина-низ
21.07.2019-02.08.2019	1,4 см	Восточный край, середина-низ
02.08.2019-14.08.2019	0,7 см	Восточный край, середина-низ
14.08.2019-26.08.2019	0,4 см	Восточный край
26.08.2019-07.09.2019	0,5 см	Восточный край, середина
07.09.2019-19.09.2019	1,9 см	Все края
19.09.2019-01.10.2019	1,4 см	Полоса в средней части
01.10.2019-13.10.2019	1, 5 см	Верхняя часть оползня



Заключение

1. В результате оползня 11 декабря 2018 г. объем сошедшего со склона сопки грунта составил не менее 18,5 млн м³, максимальное вертикальное смещение отражающей поверхности относительно цифровой модели рельефа SRTM после схода оползня достигло 140-150 м, что сделало невозможным формальное использование SRTM DEM для решения задачи дифференциальной интерферометрии.
2. Благодаря усовершенствованию методики дифференциальной интерферометрии удалось решить задачу мониторинга динамики поверхности оползневого цирка в 2019 году.
3. Выявлено, что в течение зимы 2019 года не обнаружено сколь-нибудь заметных смещений подстилающей поверхности на оползневом склоне. Взрывы перемычки в русле реки в конце января-начале февраля не повлекли новых подвижек грунта.
4. Сильные дожди в мае-июне оказались причиной потери интерферометрической когерентности, сделав невозможными фазовые измерения.
5. Признаки локальных подвижек скального грунта в пределах цирка амплитудой порядка 1-2 см наблюдались с конца июля 2019 года.
6. Необходимо продолжать мониторинг!