

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2019»

Возможности радиолокационной интерферометрии по данным С-диапазона для мониторинга медленных смещений поверхности на примере Бурейского оползня

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, пл. Введенского, 1, 141190, Московская область, г. Фрязино, e-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

В докладе приведены результаты интерферометрических измерений смещений поверхности на месте Бурейского оползня, произошедшего в декабре 2018 г., по двухгодичной серии данных радиолокатора С-диапазона на борту космического аппарата Sentinel-1. Зафиксировано отсутствие значимых (свыше нескольких миллиметров) смещений на склоне в течение трёх месяцев после события, в том числе в даты взрывных работ по расчистке русла в конце января 2019 г. Обнаружены мелкомасштабные постоянно шедшие смещения величиной 1-7 см за 12 дней в зимние месяцы предшествующих двух лет.

The paper contains results of interferometric measurements of surface displacements for the Bureya landslide occurred in December, 2018. We used 2-years series of Sentinel-1 C-band radar data. No noticeable displacement (above first millimeters) of the riverbank soils because of the blasting operations in the riverbed cofferdam in the end of January 2019 was detected. Small-scale permanent soil motion reaching up to 1-7 cm/12 days was revealed in two precedent winters.

Радиолокационная интерферометрия является широко используемым дистанционным методом измерения мелкомасштабных сдвигов на поверхности Земли — таких, как смещения в результате землетрясений [1], движения ледников [2], оседания грунта техногенного характера [3] и по другим причинам. Для территорий, покрытых растительностью, L-диапазон радиоволн является предпочтительным при интерферометрической обработке с целью выявления динамики поверхности, поскольку не столь подвержен декорреляции за счёт мелкомасштабных изменений рассеивающей поверхности за время между съёмками по сравнению с более коротковолновыми диапазонами С и Х. Однако в некоторых случаях С-диапазон оказывается пригоден для анализа: длинные серии данных с постоянным интервалом между съёмками дают информацию, какое время года и какие погодные условия благоприятны для получения информативных интерферограмм; серии карт когерентности полезны для выявления нестабильных участков; сравнение подвижного участка с соседними стабильными областями выявляет особенности динамики.

Фазовые измерения по району оползня

Масштабный сход оползня на реке Бурея привлёк всеобщее внимание в декабре 2018 г. В 80 км ниже по течению от поселка Чекунда катастрофический сход грунта перекрыл русло шириной около полукилометра, создав угрозу затопления близлежащих населенных пунктов, а также разрушения объектов жилой и промышленной инфраструктуры, расположенных у реки ниже по течению, из-за прогнозируемого на весну прорыва естественной плотины. Оползень сошёл, судя по данным оптического (Sentinel-2) и многоспектрального (Himawari-8) инструментов, 12 декабря 2018 г [4]. Для восстановления в реке водотока в слое оползневых скальных пород в период с 22 января

по 1 февраля была проведена серия взрывов, после чего удалось сформировать протоку, обеспечившую снижение уровня воды в реке выше запруды [5].

Общедоступный архив Европейского космического агентства предоставляет для анализа данные радиолокаторов С-диапазона на борту спутников Sentinel-1, снятые с периодичностью 12 дней. Пара изображений с повторяющихся орбит, полученная в даты 10 и 22 декабря 2018 г., демонстрирует состояние берегов и русла до и после события (рис. 1).

Разность фаз $\Delta\varphi$ на интерферограмме, сформированной в результате совместной обработки пары радиолокационных снимков, содержит в первом приближении информацию о рельефе (топографическая фаза $\Delta\varphi_t$), мелкомасштабной динамике (смещениям) отражающей поверхности $\Delta\varphi_d$, флуктуациях фазы на трассе распространения сигнала $\Delta\varphi_a$, тепловых шумах аппаратуры и шумах обработки $\Delta\varphi_N$ и др. Ограничившись первыми двумя составляющими, запишем, следуя [6]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_d = -4\pi(\lambda r \sin \alpha)^{-1} l_p \Delta h - 4\pi\lambda^{-1} \Delta r_d. \quad (1)$$

Отметим, что чувствительность интерферометрической разности фаз к вариациям высот рельефа Δh растет с увеличением перпендикулярной компоненты интерферометрической базы l_p , с уменьшением длины волны λ , угла обзора α и наклонной дальности r до поверхности. Для радара Sentinel-1 длина волны равна 5,6 см, наклонная дальность от радара до поверхности оползня 820 км. Важным числовым показателем чувствительности $\Delta\varphi_t$ к рельефу является высота неоднозначности h_a , обозначающая такой перепад высоты рельефа между двумя точками на местности, при котором значения разности фаз на интерферограмме в соответствующих элементах изображения отличаются на 2π :

$$h_a = \lambda r (2l_p)^{-1} \sin \alpha. \quad (2)$$

Показателем информативности фазовой информации на интерферограмме является когерентность, показывающая степень декорреляции двух изображений:

$$\gamma = \frac{E\{z_1 \cdot z_2^*\}}{E\{|z_1|^2\} E\{|z_2|^2\}},$$

где z_1 и z_2 — комплексная величина обратного рассеяния, полученная при первой и второй съёмке, $E\{\}$ — операция пространственного усреднения. Фаза величины γ , равная разности фаз, полученных при первой и второй съёмках, взятая в каждом элементе изображения, составляет интерферограмму, а модуль γ определяет степень декорреляции двух изображений: от 0 (полная декорреляция) до 1 (идеальная корреляция).

Для С-диапазона и интервала между съёмками 12 суток основным источником декорреляции являются изменения поверхности, особенно покрытой растительностью: ветровое смещение ветвей деревьев, интенсивный рост листьев и травы весной, изменения влажности почвы и растительности за счёт осадков. Изменения, кардинально преобразующие поверхность — такие, как одномоментный сход оползня, — также приводят к полной декорреляции, что и наблюдается на паре 10-22 декабря 2018 г. (рис. 1). Оранжевым эллипсом помечен район сошедшего оползня на обоих амплитудных

изображениях и на карте когерентности, красный контур на карте когерентности отмечает русло реки и её притоков. Помимо изменений в районе оползневого цирка, околонулевая когерентность наблюдается также в зоне воздействия ледяно-водной волны, поднятой в результате схода грунта в русло реки, где деревья были смыты, на рис. 1в это тёмные области на северном берегу реки Буреи справа и слева от устья притока Средний Сандар, напротив которого находится оползневый склон. Интересно отметить, что эти же участки (оползневый цирк и зона смытого леса) на всех последующих 12-дневных парах оказываются наиболее стабильными, с когерентностью, принимающей значения выше, чем в среднем по изображению. Причина этого в том, что отсутствие растительного покрова и морозная погода делают условия рассеяния почти постоянными, не меняющимися со временем, и, таким образом, обеспечивают лучшую корреляцию изображений, полученных с повторяющихся орбит с интервалом 12 дней. Именно поэтому появляется возможность проследить возможную динамику в области оползневого цирка после события.

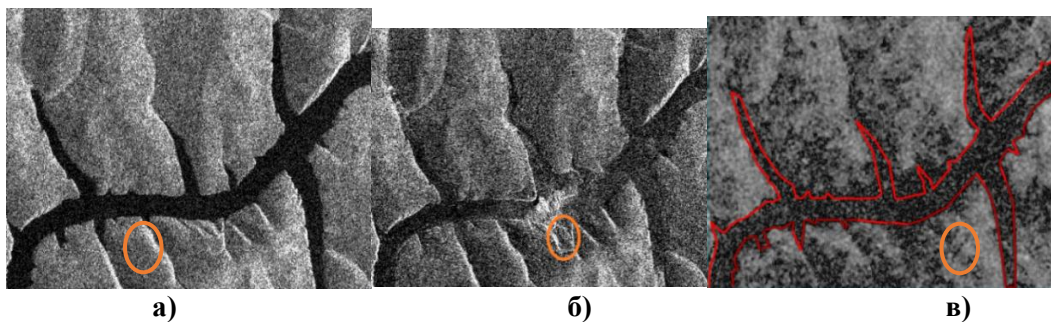


Рис. 1. Амплитудные изображения 10 декабря 2018 г. до схода оползня (а) и 22 декабря 2018 г. после схода оползня (б), интерферометрическая когерентность этой пары (в)

При интерферометрической обработке пар изображений, оба из которых получены после схода оползня, первостепенным является вопрос о разделении вкладов $\Delta\varphi_t$ и $\Delta\varphi_d$ в (1), поскольку рельеф склона изменился со сходом оползня. В случае единственной интерферограммы и отсутствия новой уточнённой цифровой модели рельефа это сделать было бы невозможно. Однако наличие серии интерферограмм с 22 декабря 2018 г. по 9 апреля 2019 г. с двух условных трасс, различающихся углами обзора (32° и 42° к местной вертикали, соответственно), позволяет провести сравнение, оценить зависимость разности фаз на оползневом склоне от величины базы интерферометра и, на основании зависимости знака разности фаз от знака базы интерферометра, сделать предположение о том, что вариации разности фаз на интерферограммах после схода оползня вызваны только изменением рельефа (т.е. составляющей $\Delta\varphi_t$ в (1)). Для подтверждения этого предположения использован метод коротких баз [7] и метод дифференциальной интерферометрии с двумя базами [8], в котором производят вычитание интерферограмм с близкими значениями базы, чтобы на результирующей дифференциальной интерферограмме скомпенсировать составляющую $\Delta\varphi_t$. Рассмотрим оба подробнее.

Достаточно малые значения базы интерферометра — например, 9 м в паре 15.02.2019-27.02.2019, 8 м в паре 17.12.2018-29.12.2019, 16 м в паре 10.01.2019-22.01.2019 — соответствуют высоким значениям высоты неоднозначности h_a (2), которая для названных пар составляет 1957 м, 2222 м и 1096 м, соответственно. При таких значениях h_a отклонение от цифровой модели рельефа в 100 м будет соответствовать приблизительно $1/20$ от 2π для первых двух пар и приблизительно $1/10$ для третьей, т.е. составит 0.3 или 0.6 рад. Колебания профиля разности фаз, построенные

поперёк ложа оползня, для этих пар не превышают названных значений более, чем на 0.1 рад, что означает, что на компоненту $\Delta\varphi_d$ остаётся не более 0.1 рад. В пересчёте на радиальные смещения поверхности эта величина составляет 0.4 мм за 12 дней.

Метод сложения (вычитания) интерферограмм может быть особенно полезен в тех случаях, когда предполагается медленное смещение с постоянной скоростью. Если базы интерферометра в двух парах равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку, в результате сложения фаз получаем:

$$\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = -4\pi(\lambda r \sin \alpha)^{-1} l_{p1} \Delta h - 4\pi\lambda^{-1} \Delta r_{d1} - 4\pi(\lambda r \sin \alpha)^{-1} l_{p2} \Delta h - 4\pi\lambda^{-1} \Delta r_{d2}. \quad (3)$$

Поскольку $l_{p1} = -l_{p2}$, первое слагаемое и третье взаимно уничтожатся, и на результирующей интерферограмме останется

$$\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = -4\pi\lambda^{-1} (\Delta r_{d1} + \Delta r_{d2}).$$

В случае $l_{p1} = l_{p2}$ для компенсации разности фаз, связанной с рельефом, можно вычесть фазы, однако тогда вычтутся и компоненты, связанные с динамикой поверхности, поэтому такой метод применять имеет смысл лишь тогда, когда заранее известно, что в одной из пар в промежутке между съёмками поверхность не двигалась.

На практике не всегда удаётся подобрать пары с равными величинами баз интерферометра, поэтому вводят поправочный коэффициент для одной из интерферограмм с целью компенсации составляющей $\Delta\varphi_i$. Так, например, в паре 10.01.2019-22.01.2019 $l_{p1} = 16$ м, а в паре 27.02.2019-11.02.2019 $l_{p2} = -30$ м. Умножив первую интерферограмму на $30/16 = 1.875$ и сложив со второй, получим, так же, как в (3), взаимное уничтожение компонент $\Delta\varphi_i$, и в результате

$$\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = -4\pi\lambda^{-1} (1.875 \cdot \Delta r_{d1} + \Delta r_{d2}).$$

Таким образом, суммарная интерферограмма содержит приблизительно утроенную величину сдвига, если считать, что за 12 дней смещение происходит на примерно одинаковую величину. Однако на суммарной интерферограмме максимальное колебание разности фаз в небольшой окрестности оползня составляет 0.8 радиан, что соответствует смещению в радиальном направлении на 3.5 мм. Поделив это на коэффициент 2.875, получим, что предположительное смещение за 12 дней могло составить чуть более 1 мм. Такая незначительная величина говорит о том, что, вероятнее всего, никакого смещения не было, а результирующую фазу следует отнести к ошибке измерения рельефа.

Проведённые измерения позволяют заключить, что после схода оползня никаких дополнительных смещений на склоне не происходило.

Полуторагодовая серия интерферометрических пар — фаза и когерентность

Предшествовавшие оползню события на склоне представляют не меньший интерес, чем воследовавшие, поэтому все доступные для анализа сцены, снятые Sentinel-1 по данной территории, были также приняты в рассмотрение. Съёмки происходили с таким же интервалом 12 дней, начиная с осени 2016 г. Фазовые измерения в С-диапазоне сильно затруднены в связи с катастрофически низкой когерентностью в большую часть года, за исключением морозных зимних месяцев. Так, даже непосредственно предшествующая оползню пара 28.11.2018-10.12.2018 демонстрирует среднюю по

оползневому склону когерентность 0.25, что говорит о том, что сигналы в этой паре декоррелированы, и разность фаз неинформативна. Такие же низкие значения когерентности обнаружены на оползневом склоне у всех пар с апреля по декабрь 2018 г. Однако зимой 2017-2018 г. картина меняется: когерентность принимает значения 0.5 и выше, что обеспечивает возможность фазовых измерений. Чтобы оценить общую картину, для каждого из 12-дневных промежутков в течение полутора годов с ноября 2017 г. по март 2019 были вычислены средние значения когерентности.

Помимо оценки когерентности непосредственно на месте будущего оползня, для сравнения определены также средние значения когерентности ещё для двух территорий в ближайшей окрестности: на склоне, поросшем деревьями, аналогично оползневому, и на местности, свободной от лесной растительности. График интерферометрической когерентности за полтора года приведён на рис. 2. Сравнение показывает, что луг, будучи свободным от деревьев, имеет самую высокую стабильность между съёмками (коричневая линия на графике), причём величина когерентности значительно выше зимой по сравнению с тёплым временем года. Летом и осенью встречаются отдельные пики на уровне 0.4-0.5, однако они невелики по сравнению с зимними 0.6-0.8. Покрытые лесом склоны (оползневый и стабильный, красный и зелёный цвет, соответственно) обладают меньшей когерентностью, однако в зимнее время достаточной для того, чтобы выполнять фазовые измерения по большинству интерферометрических пар. По зиме 2017-2018 гг. заметно, что когерентность на оползневом склоне чуть выше, чем на лесе. Связывать это можно с плотностью деревьев: на оползневом склоне их густота меньше, в результате чего образуется происходит рассеяние как от деревьев, так и от поверхности земли, куда частично проникает сигнал. В тёплое время года, однако, когерентность на оползневом склоне почти во всех парах наименьшая, что говорит о нестабильности этого участка. К снижению когерентности приводят, как правило, изменившиеся в результате погодных факторов условия рассеивания. На оползневом склоне дополнительным фактором декорреляции может стать хаотическое отклонение стволов деревьев от вертикали в результате постоянного сползания грунта, обозначаемое термином «пьяный лес». За 12 дней изменения наклона могут быть незаметными глазу, но при этом эффективные фазовые центры соседних элементов изображения сместятся по-разному, что приведёт к хаотичной фазовой картине. Осадки, изменения влажности и температуры воздуха могут привести к резкому падению когерентности на всех трёх тестовых участках, как это видно, например, на парах 8-20 января и 21 марта-2 апреля 2018 г. Но в первом случае (зимой) снизившаяся когерентность принимает значения не ниже 0.3, что оставляет возможность проводить фазовые измерения с некоторой степенью достоверности, а во втором (весной) на всех трёх участках падает ниже 0.2, что близко к полной декорреляции.

В связи с обнаруженной неинформативностью значений интерферометрической разности фаз в тёплое время года измерения были выполнены только на трёх сериях зимних интерферограмм: зимой 2018-2019 гг., в начале которой произошёл оползень, а также в две предшествующих зимы. Стабильность фазовой картины после события обсуждалась выше. Зимой 2016-2017 и 2017-2018 гг. ландшафт ещё не был изменён, поэтому принимать во внимание отклонения от цифровой модели рельефа не было необходимости. Тем не менее, на всех интерферограммах зимней серии на месте оползневого склона обнаружены отклонения фазы, при этом знак отклонений всегда одинаковый и не зависит от знака базы интерферометра, что указывает на динамику поверхности в качестве источника измеренных отклонений. На рис. 3 приведены значения проекции смещений на линию визирования в см. Как видно из рис. 3а) зимой 2016-2017 гг. величины смещений почти постоянны и колеблются вокруг величины 0.5 см за 12 дней. Следующей зимой (рис. 3б) сначала скорость смещений большая,

около 3 см за интервал между съёмками, а затем снижается до 0.7 см в конце марта. Возможно, бóльшие значения в начале зимы связаны с осенними дождями, вызывающими намокание и провоцирующими подвижность верхнего слоя почвы. Затем, в течение зимы, происходит постепенное промерзание почвы, замедляющее движение верхнего слоя до значений, сравнимых с предыдущей зимой.

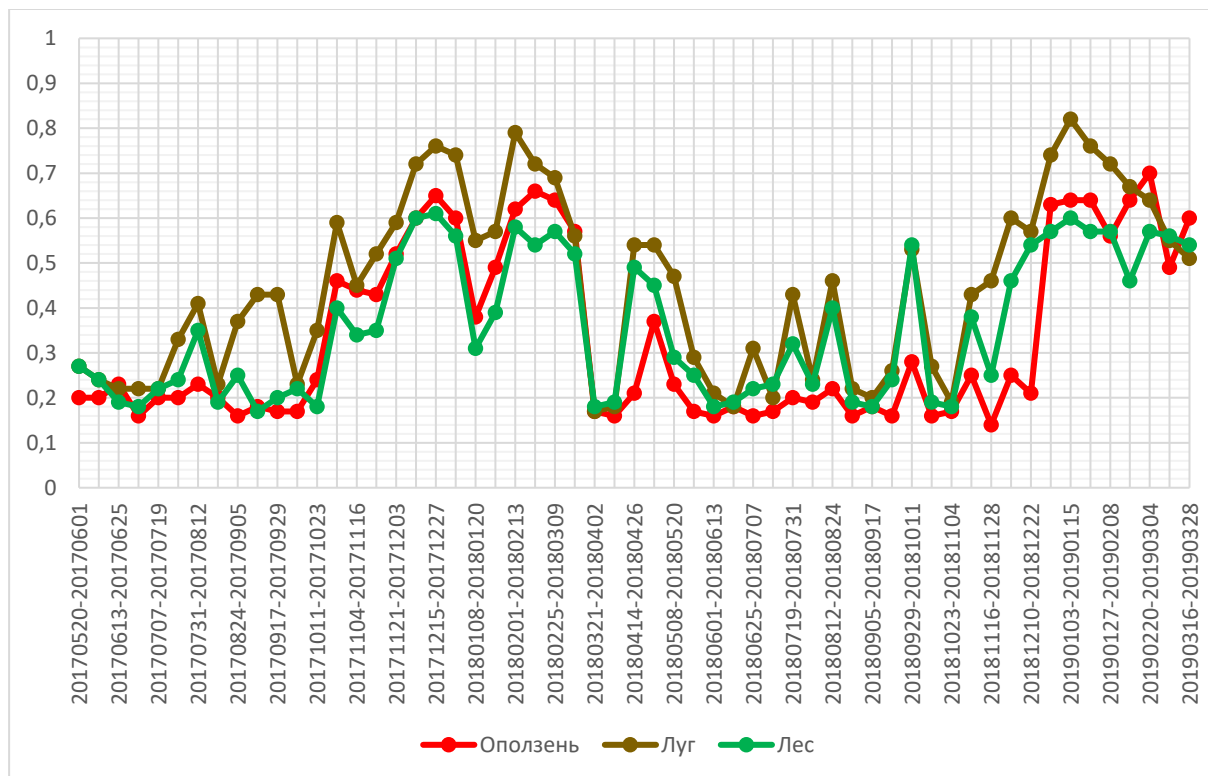


Рис. 2. Когерентность на трёх тестовых участках в 2017-2019 гг. Даты первой и второй съёмки в парах приведены в формате ггггммдд.

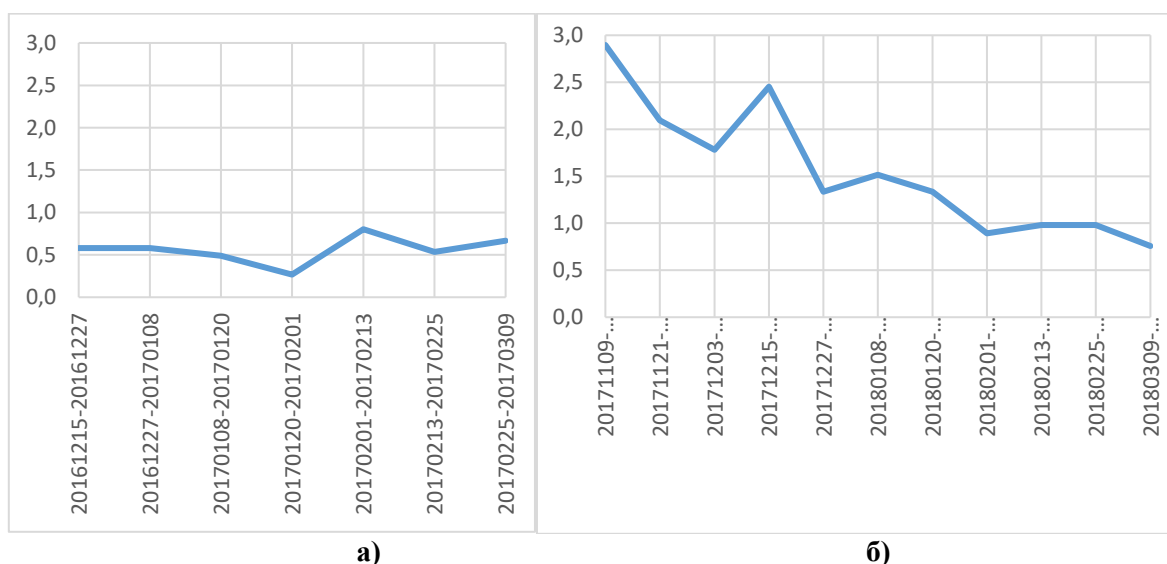


Рис. 3. Величины радиальных смещений зимой а) 2016-2017 г., б) 2017-2018 г.

Считая в первом приближении склон плоскостью, наклонённой под 30° к горизонтали, можно подсчитать коэффициент пересчёта радиальных смещений [6] в смещения вдоль склона вниз, составивший в данном случае 2.35. Следовательно,

максимальное смещение почвы по склону в начале зимы 2017-2018 гг. достигало 7 см за 12 дней, а к концу этой зимы и в предыдущую зиму составляло около 1,6 см за 12 дней.

Заключение.

На основании измерений по двухлетней серии изображений Sentinel-1 можно утверждать, что оползневый процесс шёл по меньшей мере с зимы 2016-2017 г. Летом 2017 и 2018 гг. фазовые измерения в С-диапазоне недоступны по причине крайне низкой корреляции. Зимой после оползня дополнительных смещений в оползневом цирке не обнаружено. В две предшествующие зимы обнаружен постоянно идущий процесс смещения в направлении от точки съёмки, что в имеющейся геометрии съёмки соответствует направлению вниз по склону и составляет от 1.6 до 7 см за 12 дней.

Литература

1. Massonnet, D., et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // *Nature*. — 1993. — Vol. 364, №8. — P. 138—142.
2. Goldstein, R.M., et al. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an antarctic ice stream // *Science*. — 1993. — Vol. 262. — P. 1525—1530.
3. Zakharov, A.I., Eпов, M.I., Mironov, V.L., Chymitdorzhiev, T.N., Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Bykov, M.E., Cherepenin, V.A. Earth Surface Subsidence in the Kuznetsk Coal Basin Caused by Manmade and Natural Seismic Activity According to ALOS PALSAR Interferometry // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Volume: 6, Issue: 3 Digital Object Identifier: 10.1109/JSTARS.2013.2259220 Publication Year: 2013 , Page(s): 1578 – 1583.
4. Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Амельченко Ю.А., Бурцев М.А., Крашенинникова Ю.С., Суханова В.В., Шамилова Ю.А. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Буря 11 декабря 2018 года // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271.
5. Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Амельченко Ю. А., Бурцев М. А., Крашенинникова Ю.С., Суханова В. В., Шамилова Ю. А., Бородинская А. В. Наблюдение за ходом взрывных работ и устройством прорана в зоне схода скальных пород на реке Буря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 259–265.
6. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Красногорский М.Г. Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголкового отражателей // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 3. С. 80–92.
7. P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti, "A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 2002, vol. 40, pp. 2375-2383.
8. J. Biggs, T. Wright, Z. Lu, B. Parsons, "Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault Alaska", *Geophys. J. Int.*, 2007, vol. 170, no. 3, pp. 1165-1179.