

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЯМАЛЬСКОГО БУГРА/КРАТЕРА 2020 г.

© 2022 г. Академик РАН В. Г. Бондур<sup>1,\*</sup>, Т. Н. Чимитдоржиев<sup>1,2</sup>,  
И. И. Кирбижекова<sup>1,2</sup>, А. В. Дмитриев<sup>1,2</sup>Поступило 29.05.2022 г.  
После доработки 02.06.2022 г.  
Принято к публикации 02.06.2022 г.

Для выявления бугров пучения с аномальной динамикой рельефа и микрорельефа, включая склоны и трещинные структуры, предложена методика анализа разновременных радиолокационных изображений L-диапазона длин волн на кросс- и согласованной горизонтальной поляризации. На примере ямальского бугра, который в результате выброса газа летом 2020 г. превратился в кратер, рассчитаны величины углов переднего склона: 22–24° в 2017–2018 гг. и до 26–28° в январе 2020 г. С использованием критерия Фишера–Снедекора установлено, что зона значительных изменений на кросс-поляризации больше в 4 раза аналогичной зоны изменений на согласованной горизонтальной поляризации. Сделан вывод, что данный эффект увеличения площади деполяризации радарного сигнала связан с увеличением неоднородностей микрорельефа, т.е. с образованием трещинных структур по бугру пучения и вокруг него.

*Ключевые слова:* динамика рельефа бугров пучения, методика анализа разновременных радиолокационных изображений L-диапазона длин волн

DOI: 10.31857/S2686739722700013

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время дистанционное зондирование является одним из самых эффективных инструментов количественной и качественной оценки индикаторов изменения климата и, прежде всего, в труднодоступных арктических регионах [1–3]. При помощи активных и пассивных сенсоров различных диапазонов длин волн возможен мониторинг в масштабах всей Арктики [4–7]. В связи с климатическими изменениями и соответствующим стремлением мирового сообщества к низкоуглеродному развитию значительный научный интерес стала представлять эмиссия парниковых газов, например, в виде газовых сипов во внутренних водоемах и арктических морях [7–10]. Также актуальны, с этой точки зрения, исследования кратеров в северной части западной Сибири на полуострове Ямал [11–20]. Кратеры образовались в результате газодинамического роста бугров пучения и последующего

мощного выброса смеси газа, льда и мерзлых почвогрунтов. При помощи спутниковых оптических снимков сверхвысокого разрешения WorldView-1,2, SPOT-5 и БПЛА уточнялись даты выброса грунта. Созданы цифровые модели рельефа, выполнены оценки динамики бугров/кратеров и микрорельефа в результате выбросов почвогрунта, для выявления геоморфологических особенностей бугров/кратеров [11–20].

Необходимо отметить, что использование спутниковых снимков оптического диапазона длин волн для арктических регионов предполагает подбор данных безоблачного периода во время полярного дня. С этой точки зрения для регулярного мониторинга более эффективны данные спутниковых радиолокаторов [3, 8, 9, 21], которые способны получать информацию при любой облачности и независимо от времени суток. Цель настоящего исследования заключается в создании методики спутникового радиолокационного выявления аномальных деформаций бугров пучения на примере образования кратера (ранее бугра пучения) на полуострове Ямал в 2020 г. Этот бугор пучения (англ. perennial heaving mound — РНМ) в результате газодинамического вспучивания и дальнейшего выброса смеси газа и мерзлой почвы превратился в 2020 г. в кратер С17 [13] (координаты 70°22'22" с.ш., 68°42'22" в.д.).

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

\*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

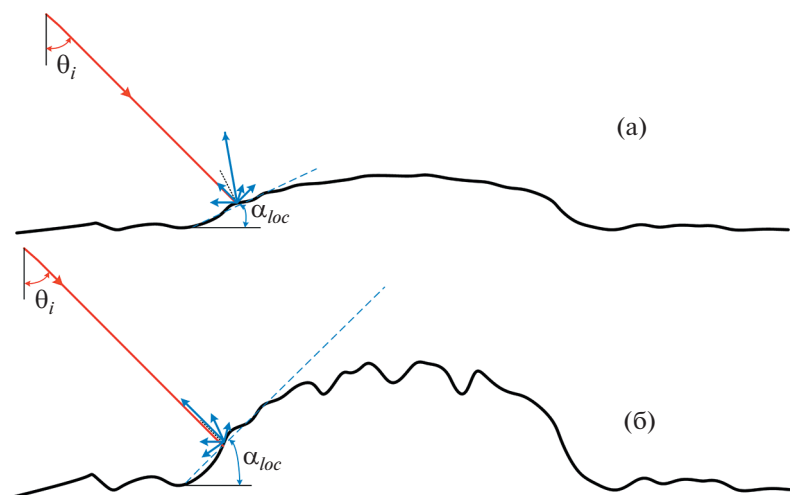


Рис. 1. Рассеяние радиолокационного сигнала: а – на начальной стадии пучения, б – при увеличении бугра пучения.

Бугры пучения представляют собой сложное шероховатое образование с различными углами наклона склонов, трещинными структурами различного масштаба и другими проявлениями микрорельефа. Полевые регулярные измерения динамики таких сложных образований не возможны из-за сложных климатических условий и труднодоступности, поэтому необходимы модельные исследования вкупе с дистанционными измерениями. При этом измерения должны быть основаны на широко известных и апробированных алгоритмах дистанционного зондирования.

#### МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДИНАМИКИ РЕЛЬЕФА БУГРА ПУЧЕНИЯ

Рассмотрим динамику обратного радарного рассеяния в L-диапазоне от переднего (обращенного к радару) склона в предположении увеличения этого бугра пучения. Использование L-диапазона позволит нивелировать влияние микрорельефа, много меньшего 24-см длины волны. На рис. 1 а представлена начальная стадия увеличения бугра пучения: красной стрелкой показан сигнал, излучаемый радиолокатором в направлении земной поверхности; синим пунктиром – касательная к поверхности переднего (по отношению к радару) склона бугра пучения; черным пунктиром показан перпендикуляр к поверхности переднего склона в точке рассеяния; стрелками синего цвета показано обратное радарное рассеяние от наклонной поверхности. Длина стрелок пропорциональна интенсивности рассеяния. На следующем рис. 1 б представлен бугор пучения после увеличения размеров. Рассеяние от переднего склона (стрелки синего цвета на рис. 1 б), обращенного к радиолокатору, изменилось за

счет изменения угла наклона поверхности рассеяния (синий пунктир на рис. 1 б). В данном случае представлен вариант, когда нормаль к плоскости рассеяния совпадает с направлением на радиолокатор и рассеяние в сторону радара максимально.

Интенсивность обратного радарного рассеяния характеризуется яркостью пиксела радиолокационного изображения. Отношение яркости пикселей, соответствующих переднему склону  $\beta_s^0$  и горизонтальной поверхности  $\beta_H^0$ , вычисляется по следующей формуле [22]:

$$\frac{\beta_s^0}{\beta_H^0} = \frac{\sin \theta_i}{\sin(\theta_i - \alpha_{loc})}, \quad (1)$$

где  $\theta_i$  – локальный угол падения радиолокационного импульса,  $\alpha_{loc}$  – уклон склона, обращенного к радару. По мере вспучивания уклон возрастает, что приводит к росту относительной яркости переднего склона бугра пучения (обращенного к радару) на фоне стабильной яркости соседних горизонтальных участков. Шероховатости рельефа не учитываются.

Известно, что процессы таяния/замерзания грунта, которые происходят в арктических регионах с апреля по ноябрь, существенно влияют на уровень радиолокационного эхо-сигнала. Поэтому для обнаружения увеличения РНМ с изменением уклона склонов (рис. 1) бугра пучения, воспользуемся анализом радарных изображений ALOS-2 PALSAR-2 зимнего периода времени на согласованной горизонтальной (НН) и кросс-поляризации (HV) за следующие даты: 09.02.2017 г., 25.01.2018 г., 10.01.2019 г., 09.01.2020 г. Максимальная пространственная интерферометриче-

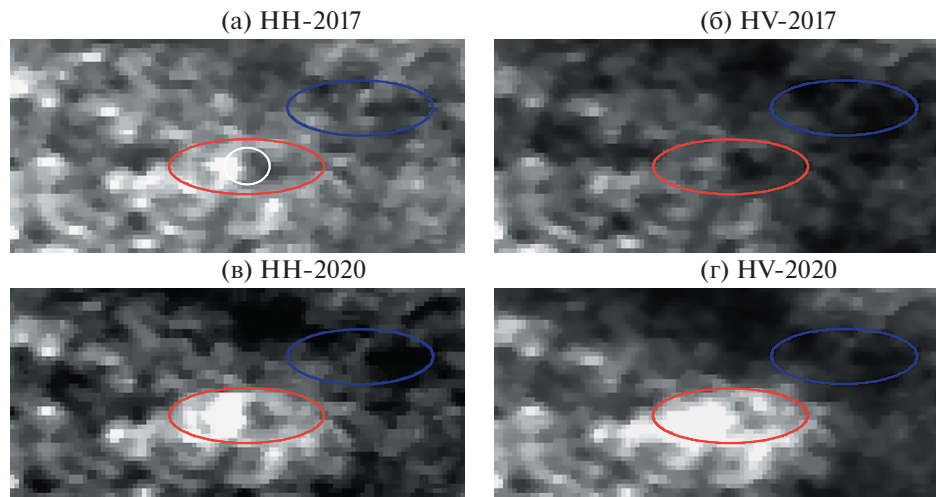


Рис. 2. Фрагменты радиолокационных изображений ALOS-2 PALSAR-2.

ская базовая линия для этих данных не превышает 280 м, что означает о незначительных различиях углов падения радиолокационного сигнала для этих разновременных изображений.

На рис. 2 приведены фрагменты изображений интенсивности. Для устранения спекл-шума изображения были фильтрованы при помощи медианного фильтра. Геокодирование и калибровка данных радиолокации выполнены с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM [23] с разрешением на местности 2 м. Тестовый участок с бугром пучения и фоновый участок стабильной горизонтальной поверхности отмечены на рис. 2 соответственно контурами красного и синего цвета. Площадь участков 9550 и 9200 м<sup>2</sup> соответственно.

Проанализируем динамику изменения яркости объекта, считая, что шероховатости много меньше длины волны L-диапазона. Для этого рассчитаем усредненные значения по территории тестового участка и максимальные значения, соответствующие переднему склону. Дальнейшее нормирование на среднюю яркость фонового участка позволяет исключить незначительное общее увеличение или снижение яркости изображений. Отношение максимального значения тестового участка и среднего значения фонового участка согласно формуле (1) позволяет оценить уклон переднего склона бугра пучения.

На рис. 3 а представлены графики изменения относительной средней яркости бугра пучения (непрерывные линии) и яркости переднего склона (пунктирные линии). По оси абсцисс отложены годы съемки, по оси ординат — отношение интенсивностей тестового и фонового участков. Для согласованной горизонтальной поляризации в 2017–2018 гг. средняя интенсивность объекта и максимальная на переднем склоне превышала

фоновые значения в 1.5 и 2.5 раза соответственно. В 2019 г. намечается небольшое увеличение, а в 2020 г. 3–4-кратный рост в среднем для бугра и 8–16-кратное увеличение на переднем склоне соответственно для HH- и HV-поляризации. Для расчета уклона преобразуем формулу (1):

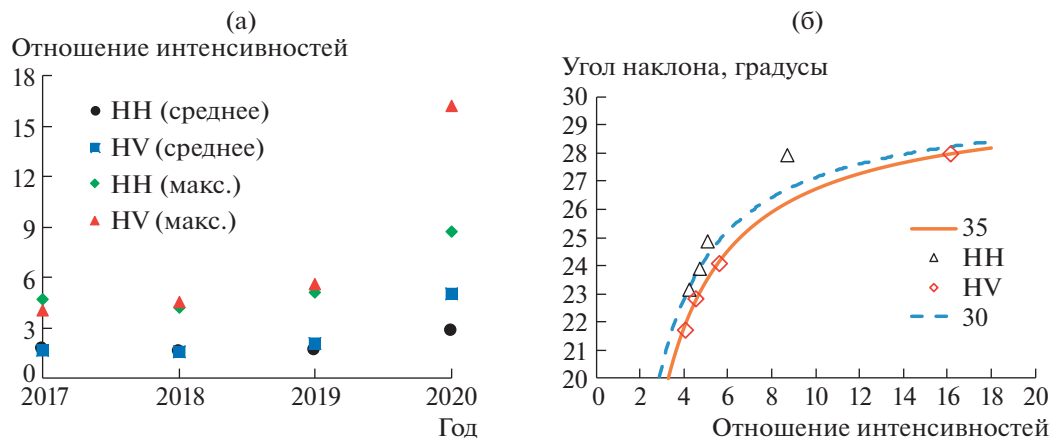
$$\alpha_{\text{loc}} = \theta - \arcsin \left( \sin \theta \frac{\beta_H^0}{\beta_S^0} \right). \quad (2)$$

При этом воспользуемся значениями локальных углов падения  $\theta_i$  по ЦМР ArcticDEM: по бугру пучения угол в основном изменяется в пределах 30–35°. На рис. 3 б приведены графики расчетной зависимости уклона  $\alpha_{\text{loc}}$  от отношения яркостей наклонной и горизонтальной поверхности  $\beta_S^0/\beta_H^0$  при двух граничных значениях локального угла падения  $\theta_i$  — 30° и 35° (линии синего и красного цвета). Там же представлена динамика угла наклона переднего склона РНМ в 2017–2020 гг. при  $\theta_i = 30^\circ$  на основе данных двух каналов поляризации HH и HV. Как видно по рис. 3 б, расчетная величина уклона переднего склона возрастает от 22–24° в 2017–2018 гг. до 26–28° в 2020 г. В среднем по бугру — от 11°–14° до 20–24°.

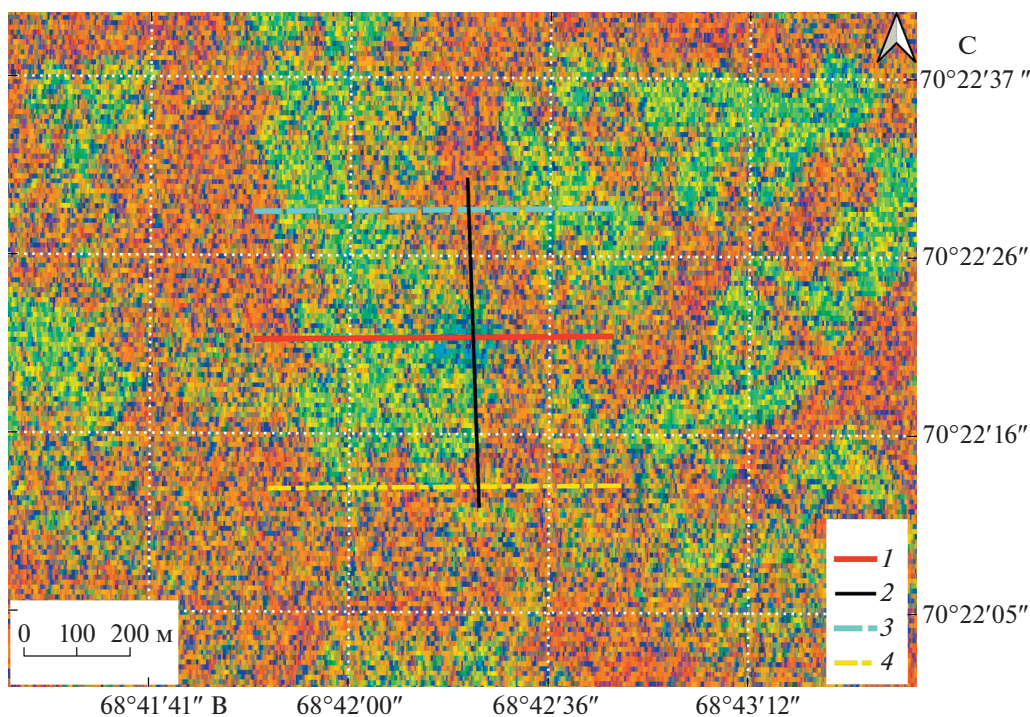
## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты выполнены в предположении отсутствия изменений шероховатости поверхности склона РНМ, и для реальной ситуации необходима корректировка.

Выполним теперь качественный визуальный анализ радарных изображений и количественную оценку динамики РНМ. На рис. 4 представлен псевдо-цветовой композит, полученный на основе расчета разновременной статистики по радарным данным ALOS-2 PALSAR-2 на кросс-поляризации



**Рис. 3.** Изменение относительной яркости и угла наклона бугра пучения в 2017–2020 гг.: а) динамика относительной средней и максимальной яркостей объекта (непрерывные и пунктирные линии); б) модельные расчеты угла наклона в зависимости от отношения интенсивностей.



**Рис. 4.** Композитное изображение на кросс-поляризации.

за 2017–2020 гг.: красный цвет – отношение стандартного отклонения к среднему значению (коэффициент вариации), зеленый цвет – минимальное значение, синий цвет – градиент изменения величины радарного рассеяния (максимальные абсолютные изменения между последовательными съемками). Для устранения спекл-шума был использован пространственно-временной фильтр Гранди [24] окном  $5 \times 5$  пикселей.

Пятно синего цвета в центре рис. 4 соответствует бугру пучения и означает максимальное увеличение величины обратного радарного рассеяния с 2017 по 2020 г. по сравнению с окружающим фоном. Это композитное изображение фактически показывает возможность обнаружения аномальной динамики РНМ при помощи качественного визуального анализа.

Далее на рис. 5 а, б представлены графики изменения ЭПР на различных поляризациях по

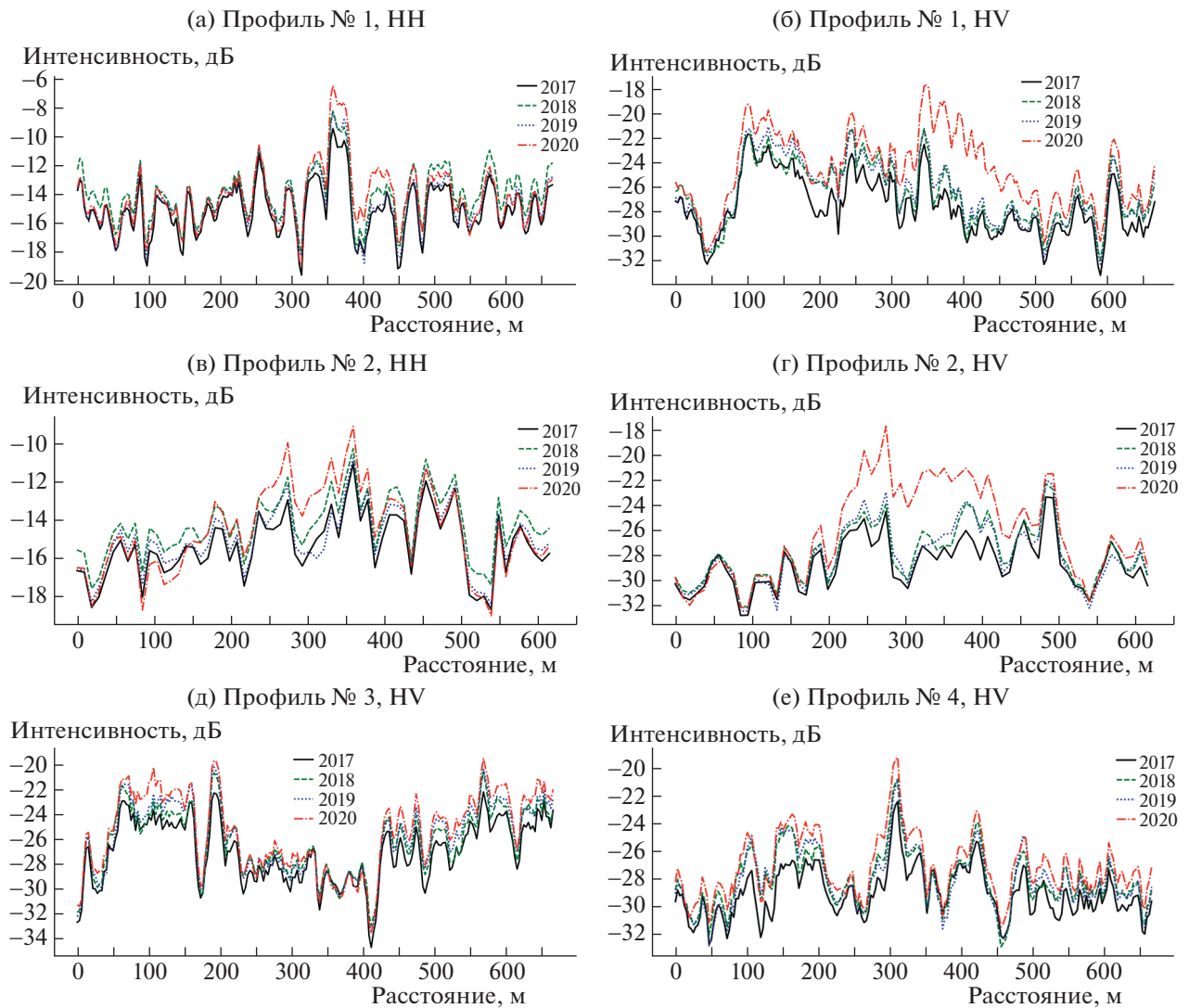


Рис. 5. Графики величины обратного радарного рассеяния для различных профилей.

данным за 2017–2020 гг., построенные вдоль профиля № 1, проведенного через центр бугра пучения с запада на восток (см. рис. 4). Центр РНМ находится на расстоянии 400 м от начала профиля. На рис. 5 в, г – аналогичные графики для профиля № 2 север–юг. Для сравнения на удалении от бугра параллельно профилю “запад–восток” проведены два других профиля – № 3 и № 4. Графики амплитуды обратного рассеяния для этих профилей представлены на рис. 5 д, е. Очевидно, что они не имеют существенных межгодовых различий.

Представленные графики демонстрируют значительное увеличение амплитуды радарного эхосигнала в январе 2020 г. по сравнению с предыдущими более стабильными годами (до 5–7 дБ на кросс-поляризации и порядка 2–4 дБ на согласованной горизонтальной поляризации), что согла-

суется с выражением (1). Различие до 3–5 дБ для кросс-поляризации и согласованной горизонтальной поляризации может быть связано с увеличением разномасштабной шероховатости поверхности, например, с образованием трещинных структур в результате интенсивного вспучивания. Отражение от подобных структур разного масштаба и различной направленности фактически вносит дополнительный вклад в радиолокационный сигнал. Данное обстоятельство сложно про-

Таблица 1. Критерий Фишера–Снедекора

	2018	2019	2020
НН	1.5	1	2.5
НВ	2.2	1.5	8.8

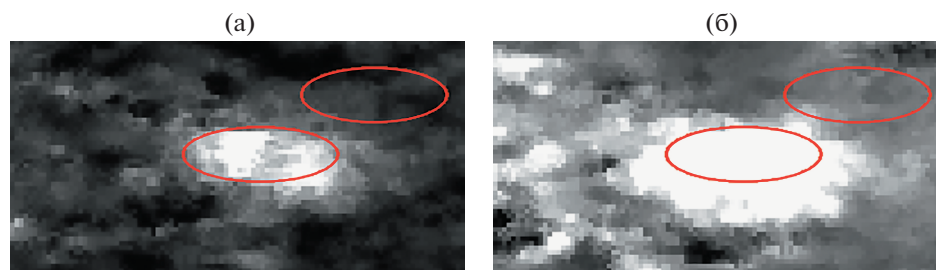


Рис. 6. Изменения интенсивности между съемками 2019 и 2020 г. для: (а) НН- и (б) НV-поляризацій.

верить ввиду редкости аналогичных событий и труднодоступности этих мест. Поэтому рассмотрим этот эффект увеличения радиолокационного эхо-сигнала при помощи классического способа: относительной пространственно-временной оценки изменений величины обратного радарного рассеяния (данные калиброваны) для бугра пучения. Для этого воспользуемся критерием Фишера–Снедекора  $F_{\text{расч}}$ , представляющего собой отношение дисперсий  $D$  или квадратов СКО за различные годы. В данном исследовании использован критерий Фишера–Снедекора в виде:

$$F_{\text{расч}} = D_{\text{Year}}/D_{2017} \quad (3)$$

где  $D_{\text{Year}}$  – дисперсия для 2018, 2019 и 2020 г.,  $D_{2017}$  – дисперсия за 2017 г. В табл. 1 представлены расчетные усредненные значения критерия Фишера–Снедекора для участка изображения, соответствующего бугру (нижний контур на рис. 2) для НН- и НV-поляризации. В 2020 г. вычисленные значения  $F_{\text{расч}}(\text{НН}) = 2.5$  и  $F_{\text{расч}}(\text{НV}) = 8.8$ , в то время как в 2018 и 2019 г. соответствующие величины порядка 2 и менее.

На рис. 6 приведены фрагменты изображений изменения интенсивности между съемками 2019 и 2020 г. для поляризацій НН (рис. 6 а) и НV (рис. 6 б). Как видно по распределению яркости, зона значительных изменений на кросс-поляризации больше в 4 раза аналогичной зоны изменений на поляризации НН (площади зон 37600 и 9550 м<sup>2</sup>).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обнаружения бугров пучения с аномальной динамикой предложена методика, позволяющая оценить изменение уклонов склонов бугров пучения по разновременным радиолокационным данным. В результате расчетов с использованием разновременных данных обратного радарного рассеяния в L-диапазоне показано, что величины уклона переднего (по отношению к радиолокатору) склона РНМ возрастают от 22–24° в 2017–2018 гг. до 26–28° в 2020 г.

Анализ величины обратного радарного рассеяния за период с 10.01.2019 г. по 09.01.2020 г. на согласованной горизонтальной и кросс-поляризации показал значительное ее увеличение на месте бугра пучения. При этом величина для кросс-поляризации выше таковой для согласованной горизонтальной на 3–5 дБ. В результате статистических оценок разности обратного радарного рассеяния при помощи критерия Фишера–Снедекора за указанный период и за промежуток времени с 25.01.2018 г. по 10.01.2019 г. установлено, что зона значительных изменений на НV-поляризации больше в 4 раза аналогичной зоны изменений на поляризации НН. Сделан вывод, что данный эффект связан с увеличением неоднородностей микрорельефа, т.е. с образованием трещинных структур по бугру пучения и вокруг него.

Таким образом, предложена методика, позволяющая выявить аномальную динамику рельефа бугров пучения, с целью прогнозирования выбросов газа с образованием кратеров на основе анализа данных величины обратного радарного рассеяния L-диапазона зимнего периода времени на согласованной и кросс-поляризациях.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Японскому аэрокосмическому агентству (JAXA) за данные ALOS-2 PALSAR-2, предоставленные в рамках проекта ALOS-2 RA6 (PI-3402).

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kulmala Markku, Hanna K. Lappalainen, Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Yrjö Viisanen, Matvienko G., Melnikov V., Baklanov A., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: Grand Challenges in the Arctic-Boreal Context // *Geography. Environment. Sustainability*. 2016. No. 2(9). P. 5–18.  
[https://doi.org/10.15356/2071-9388\\_02v09\\_2016\\_01](https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01)

2. *Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А.* Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739720050047>
3. *Abe T., Iwahana G., Efremov P.V., et al.* Surface Displacement Revealed by L-band InSAR Analysis in the Mauya Area, Central Yakutia, Underlain by Continuous Permafrost // *Earth Planets Space*. 2020. 72. 138.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-020-01266-3>
4. *Philipp M., Dietz A., Buchelt S., Kuenzer C.* Trends in Satellite Earth Observation for Permafrost Related Analyses—A Review // *Remote Sens*. 2021. 13, 1217.  
<https://doi.org/10.3390/rs13061217>
5. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.  
<https://doi.org/10.7868/S0205961415040028>
6. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
7. *Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P.* Dissolved Organic Matter and Its Optical Characteristics in the Laptev and East Siberian Seas: Spatial Distribution and Interannual Variability (2003–2011) // *Ocean Science*. 2018. V. 14. No. 1. P. 87–103.  
<https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
8. *Pointner G., Bartsch A., Dvornikov Y.A., Kouraev A.V.* Mapping Potential Signs of Gas Emissions in Ice of Lake Neyto, Yamal, Russia, Using Synthetic Aperture Radar and Multispectral Remote Sensing Data // *The Cryosphere*. 1907–1929.  
<https://doi.org/10.5194/tc-15-1907-2021>
9. *Pointner G., Bartsch A.* Mapping Arctic Lake Ice Backscatter Anomalies Using Sentinel-1 Time Series on Google Earth Engine. *Remote Sens*. 2021. 13, 1626.  
<https://doi.org/10.3390/rs13091626>
10. *Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43.  
<https://doi.org/10.7868/S020596141504003X>
11. *Kizyakov A., Khomutov A., Zimin M., Khairullin R., Babkina E., Dvornikov Y., Leibman M.* Microrelief Associated with Gas Emission Craters: Remote-Sensing and Field-Based Study // *Remote Sens*. 2018. 10. 677.  
<https://doi.org/10.3390/rs10050677>
12. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kishankov A.* Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic // *Geosciences*. 2020. 10. 215.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences10060215>
13. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin E., Bukhanov B., Umnikov A.* New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // *Geosciences*. 2021. 11. 71.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>
14. *Zolkos S., Fiske G., Windholz T., Duran G., Yang Z., Olenchenko V., Faguet A., Natali S.M.* Detecting and Mapping Gas Emission Craters on the Yamal and Gydan Peninsulas, Western Siberia // *Geosciences*. 2021. 11. 21.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences11010021>
15. *Chuvilin E.M., Sokolova N.S., Bukhanov B.A., Davletshina D.A., Spasennykh M.Y.* Formation of Gas-Emission Craters in Northern West Siberia: Shallow Controls // *Geosciences*. 2021. 11. 393.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences11090393>
16. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Sizov O., Kishankov A., Kargina T.* Seyakha Catastrophic Blowout and Explosion of Gas from the Permafrost in the Arctic, Yamal Peninsula // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. V. 196. 103507, ISSN 0165-232X.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103507>
17. *Kizyakov A., Leibman M., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Dhont D., Cauquil E., Pushkarev V., Stanilovskaya Y.* Gas Emission Craters and Mound-Predecessors in the North of West Siberia, Similarities and Differences // *Remote Sens*. 2020. 12, 2182.  
<https://doi.org/10.3390/rs12142182>
18. *Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D., Bukhanov B., Stanilovskaya J., Badetz C., Spasennykh M.* Conceptual Models of Gas Accumulation in the Shallow Permafrost of Northern West Siberia and Conditions for Explosive Gas Emissions // *Geosciences*. 2020. 10. 195.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences10050195>
19. *Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Sokolova N., Bukhanov B.* Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic // *Geosciences*. 2020. 10, 383.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences10100383>
20. *Бозоявленский В.И., Бозоявленский И.В., Каргина Т.Н., Никонов Р.А.* Цифровые технологии дистанционного обнаружения и мониторинга развития бугров и воронок катастрофических газовых выбросов в Арктике // Арктика. Экология и Экономика. 2020. № 4(40). С. 90–105.  
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-90-105>
21. *Murfitt J., Duguay C.R.* 50 Years of Lake Ice Research from Active Microwave Remote Sensing: Progress and Prospect // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 264. 112616, ISSN 0034-4257.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112616>
22. Principles and Applications of Imaging Radar: Manual of Remote Sensing: Third Edition, Vol. 2, Ed. F.M. Henderson and A.J. Lewis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
23. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platton M., Wethington M. Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojesen M.* 2018, “ArcticDEM”.  
<https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
24. *De Grandi G.F., Leysen M., Lee J.S., Schuler D.* Radar Reflectivity Estimation Using Multiple SAR Scenes of the Same Target: Technique and Applications // *In Proc. IEEE Int. Remote Sens. Sci. Vis. Sustain. Develop. Geosci. Remote Sens. (IGARSS'97)*, Aug. 3–8, 1997. V. 2. P. 1047–1050.

**RADAR DETECTION OF ANOMALOUS DYNAMICS  
OF PERENNIAL HEAVING MOUNDS.  
2020 YAMAL MOUND/CRATER CASE STUDY**

**Academician of the RAS V. G. Bondur<sup>a,#</sup>, T. N. Chimitdorzhiev<sup>a,b</sup>,  
I. I. Kirbizhekova<sup>a,b</sup>, and A. V. Dmitriev<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup> *AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

To detect perennial heaving mounds with relief and microrelief anomalous dynamics, including slopes and fractures, we suggest the method of analysis of multitemporal HV- and HH-L-band radar images. Using the example of the Yamal heaving mound, which turned into a crater as a result of a gas outburst in the summer of 2020, the values of the front slope angles are calculated: 22°–24° in 2017–2018, and up to 26°–28° in January 2020. Using the Fisher–Snedecor test, it was established that the HV-zone of changes is 4-fold greater than the HH one. It is concluded that this effect of increasing the area of radar signal depolarization is associated with an increase in microrelief inhomogeneities, i.e. with the formation of fractures along the heaving mound and around it.

*Keywords:* microrelief anomalous dynamics of perennial heaving mounds, method of analysis of multitemporal HV- and HH-L-band radar images