

Оценка деформации поверхности ледников бассейна реки Пскем по данным Sentinel-1A

Э. Р. Семакова, М. Г. Поторжинский

*Астрономический институт им. Улугбека Академии наук
Республики Узбекистан, Ташкент, 100052, Узбекистан
E-mail: ella9sem@gmail.com*

Методы дистанционного зондирования — эффективное средство наблюдения за изменением состояния ледников, расположенных в труднодоступных высокогорных районах. Для трёх ледников бассейна реки Пскем, Западный Тянь-Шань, где проводятся гляциологические экспедиционные наблюдения (ледники Баркрак Средний, Пахтакор, Текешсай), проведён анализ изменения высоты поверхности за период радиолокационной съёмки Sentinel-1. В работе использованы методы дифференциальной интерферометрии DInSAR (*англ.* Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) и малых базовых линий SBAS (*англ.* Small BAseline Subset). Обработка отдельных пар радиолокационных снимков методом DInSAR проведена в программе SNAP (*англ.* SeNtinel Application Platform). В методе SBAS использованы продукты сервиса интерферометрической обработки ASF DAAC HyP3 2024 (*англ.* Alaska Satellite Facility, Distributed Active Archive Center, Hybrid Pluggable Processing Pipeline). Расчёт деформации поверхности ледников проведён с августа 2021 по август 2024 г. с периодичностью съёмки 12 дней и с 2015 по 2024 г. с интервалом съёмки один год. Для каждой интерференционной пары выполнена коррекция деформации с учётом атмосферной поправки GACOS (*англ.* Generic Atmospheric Correction Online Service) и нормировка к единой опорной точке, имеющей максимальное значение когерентности всей выборки снимков. Эти процедуры позволили получить наиболее достоверные результаты накопленной деформации. Двенадцатидневные чередования оседания и поднятия ледников в летний период зависят от сопутствующих метеорологических условий, ползучести ледника и топографии подледникового ложа. Съёмка с годовой периодичностью позволила провести сравнение измеренной деформации поверхности ледников с данными наземных наблюдений.

Ключевые слова: данные Sentinel-1, ледники, горные районы Узбекистана, метод малых базовых линий, деформация поверхности, бассейн реки Пскем

Одобрена к печати: 07.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-269-275

Введение

Ледники — важный индикатор климатических изменений и один из источников пресной воды. Оценка их состояния на регулярной основе является актуальной задачей научных исследований, особенно в засушливых районах Центральной Азии. Для идентификации ледников в труднодоступных районах и расчёта их площади используют мультиспектральную космическую съёмку на конец периода абляции ледников (Руководство..., 1966; Racoviteanu et al., 2009). При сравнении данных первых каталогов ледников (Каталог..., 1968) и данных современной космической съёмки отмечается тенденция к сокращению их площади и увеличению количества в результате распада ряда крупных ледников (Семакова, Семаков, 2017). Однако применение мультиспектральных снимков зачастую ограничено присутствием облачности и заснеженности, характерной для гляциальных районов. Кроме того, на точность определения площади оледенения существенно влияет моренное покрытие ледников и наличие теней с крутых склонов, поэтому большой интерес в задачах гляциологии представляет применение радиолокационной космической съёмки.

Методы радиолокационной съёмки позволяют проводить измерения в любое время суток, независимо от наличия облачности, получать всепогодные амплитудные данные отражённых электромагнитных волн от поверхности Земли, создавать цифровые модели рельефа, используемые для оценки баланса массы ледников, и строить карты деформации поверхности, в том числе поверхности ледников.

В общем случае для изучения смещений поверхности и вертикальной деформации объектов традиционно используют методы дифференциальной интерферометрии DInSAR (*англ.* Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) и малых базовых линий SBAS (*англ.* Small BAseline Subset). Для выявления геодинамических процессов широкое применение получил метод Stacking InSAR (Бондур и др., 2023; Zhang et al., 2021). Учитывая высокую точность измерений с использованием этих методов, в настоящей работе рассмотрено их применение для изучения ежегодного изменения высоты поверхности ледников Узбекистана, на которых проводятся гляциологические измерения, с целью сравнения с наземными наблюдениями и оценки возможности применения для других ледников района исследований.

Район исследования, исходные материалы и методы исследования

Район исследования включает более 260 ледников бассейна реки Пскем, расположенного в отрогах Западного Тянь-Шаня. Первые наземные наблюдения на ледниках выполнялись в 1960-х гг. В настоящее время наблюдения за балансом массы проводятся на двух ледниках — на леднике Баркрак Средний с 2016 г. (Петров и др., 2021) и на леднике Пахтакор с 2023 г. (www.eecea-water.net). Эпизодические наблюдения ведутся на леднике Текеш (*рис. 1*). Оценка изменения высоты поверхности ледников осуществляется по показаниям абляционных реек, установленных с помощью GPS (*англ.* Global Positioning System). Полевые измерения проводятся на конец периода абляции ледников (август — сентябрь).



Рис. 1. Ледники (слева направо) Пахтакор, Баркрак и Текеш, съёмка системой Sentinel-2B, 08.09.2021. Чёрными линиями отмечены их границы

Анализируя положение тестовых ледников, получено, что ледник Баркрак Средний, площадью $1,8 \text{ км}^2$, северной экспозиции, может иметь небольшой дополнительный приток снега от схода лавин на высоте 4080 м с юго-западного и восточного склона. Ледник Пахтакор, площадью $2,68 \text{ км}^2$, верхней границей 4042 м, расположен на северном склоне и пополняется, в основном, твёрдыми осадками в период аккумуляции. Ледник Текешсай, площадью $1,27 \text{ км}^2$, средней высотой 3875 м, расположен на южном склоне и пополняется осадками и сходом лавин с крутого южного склона.

Исходными материалами для проведения данного исследования стали интерферометрические радиолокационные данные со спутника Sentinel-1A нисходящего направления орбиты съёмки.

Важную роль при построении карт деформации поверхности и карт цифровых моделей рельефа играют подбор наилучших пар снимков, выбор алгоритма и параметров проведения расчёта.

По результатам корегистрации снимков и создания интерферограммы методом DInSAR в программе SNAP (*англ.* SeNtinel Application Platform), разработанной для обработки снимков Sentinel, проводилось удаление топографической фазы и фазовая фильтрация методом Гольдштейна. Большое внимание уделялось выявлению оптимальных параметров расчёта

в процессе развёртки фазы, влияющих на точность измерения вертикального смещения. Наилучшими для составления карт деформации поверхности данного района стали пары снимков с минимальным базовым расстоянием пролёта и минимальным интервалом съёмки в 12 дней. Для создания цифровых моделей рельефа наилучшими были пары снимков с максимальным базовым расстоянием и минимальным интервалом съёмки. Разрешение полученных карт могло достигать 10 м, однако при использовании в обработке нескольких пар радиолокационной съёмки требовалось слишком много времени.

В методе SBAS для обработки длинных рядов съёмки были использованы возможности онлайн платформы ASF DAAC HyP3 2024 (*англ.* Alaska Satellite Facility, Distributed Active Archive Center, Hybrid Pluggable Processing Pipeline), позволяющей осуществлять подбор подходящих пар снимков в одинаковой геометрии съёмки и их обработку в программном обеспечении GAMMA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). Выходная продукция с пространственным разрешением 40 и 80 м содержала информацию об амплитуде принятого сигнала, развёртке фаз, когерентности; файлы смещений (как в направлении на спутник, так и по вертикали) и метафайлы с информацией о параметрах проведённой обработки (применённая маска, фильтры, координаты контрольной точки, относительно которой измерялась деформация, и др.).

Согласно приведённой документации по продукции InSAR и водной маскировке, выполненный анализ временных рядов позволил выявить и исправить ошибки развёртки фазы, учитывая разность фаз в контрольной точке в каждой паре, а также минимизировать скачки фазы на суше вблизи водоёмов. Отметим, что знак результирующего смещения по вертикали и по направлению к спутнику был противоположен знаку развёрнутой фазы, поскольку расчёт смещения проводился относительно поверхности Земли.

Учитывая, что метеоусловия в гляциальных районах могут задерживать передачу радиосигнала, для каждой интерферограммы проведена коррекция деформации с учётом атмосферной поправки, полученной с онлайн-сервиса GACOS (*англ.* Generic Atmospheric Correction Online Service) (<http://www.gacos.net>), в модели которого использовались данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды и цифровых моделей рельефа.

Воспользовавшись алгоритмом коррекции интерферограммы каждой пары ряда SBAS к единой контрольной точке, приведённой в документации, была выявлена точка (стабильный отражатель) с максимальным значением когерентности и наиболее близко расположенная к исследуемым ледникам. Процедуры перенормировки всех интерференционных пар к единой контрольной точке и применения атмосферной коррекции позволили значительно улучшить точность измеряемой деформации.

Результаты и обсуждения

Сбор интерференционных пар в методе SBAS проводился с различным интервалом съёмки, соблюдая непрерывность ряда для расчёта накопленной деформации ледников.

Всего за период 2021–2024 гг. с интервалом съёмки 12 дней было использовано 112 пар снимков Sentinel-1A. Для сравнения ежегодного вертикального смещения/деформации поверхности ледников с наземными данными проводилось последовательное суммирование смещений непрерывного ряда съёмки с августа по август следующего года, осреднённое по площади ледника. Накопленная деформация поверхности тестовых ледников, рассчитанная с интервалом съёмки 12 дней, показала повышение поверхности ледников, что не соответствовало данным наземных наблюдений, регистрирующих отрицательный баланс массы. Причинами этого несоответствия могут быть длительный период аккумуляции ледников с постоянным выпадением снега, что вносит большую погрешность в измерения деформации ледников, поскольку участки, покрытые снегом, имеют низкую когерентность и значительные вариации в проникновении и отражении радиолокационного сигнала от снега.

Накопленная деформация поверхности ледников за период с 19 августа 2015 по 31 августа 2024 г., рассчитанная по данным Sentinel-1A с интервалом съёмки в один год, оказалась

согласованной с наземными данными, что объясняется редким выпадением снега в летний период и небольшими вариациями в проникновении и отражении сигнала ото льда (в десятки раз меньше, чем от снега). Максимальное значение когерентности составило 0,93; среднее значение когерентности ледников оказалось в пределах от 0,21 до 0,31. Результаты сравнения рассчитанной деформации за годы проведения экспедиционных работ на леднике Баркрак Средний с данными наблюдений показали, что диапазон ежегодной разности высоты поверхности ледника по абляционным рейкам значительно больше, чем по данным Sentinel-1. Для устранения занижения деформации поверхности ледников был применён нормирующий коэффициент, равный 10, позволяющий учесть разброс проникновения радарной волны в толщу льда и получить деформацию поверхности ледников, сравнимую с данными экспедиционных наблюдений.

В итоге за период наблюдений на леднике Баркрак Средний (с 2016/2017 по 2023/2024 г.) накопленная деформация этого ледника с периодом съёмки в один год составила $-0,113$ м, ледника Пахтакор: $-0,193$ м, ледника Текешсай: $-0,157$ м. Карты поверхностной деформации ледников представлены на *рис. 2–4* (см. с. 273), где участки понижения отображены синим цветом, участки повышения поверхности ледника — красным.

Сравнительная оценка за каждый год показала, что деформация за пять лет из восьми соответствовала отрицательному балансу массы ледника Баркрак Средний (2018, 2019, 2021, 2023 и 2024 гг.) с коэффициентом корреляции 0,82. Разность поверхностной деформации ледника за эти годы и данных наблюдений составляла в среднем 27 %.

Причинами положительной деформации некоторых участков ледников могут быть накопление за счёт лавинных отложений, сход которых возможен с крутых склонов, окаймляющих ледник, а также движение ледников вниз по склону и шероховатость подледникового рельефа.

Наблюдаемые колебания высоты поверхности ледников по данным Sentinel-1A при периодичности съёмки 12 дней возможно связаны с неравномерным распределением осадков по горным районам (Геткер, 1988), а также с такими явлениями, как:

- выпадение дождя и последующая минусовая температура воздуха, что может привести к сантиметровому приросту высоты ледника и изменению формы его поверхности;
- процесс таяния при отрицательной температуре и солнечной погоде, при котором количество льда не уменьшится, но поверхность его понизится, что приведёт к изменению формы поверхности ледника;
- оседание выпавшего снега под собственным весом, что может привести к снижению высоты поверхности ледника.

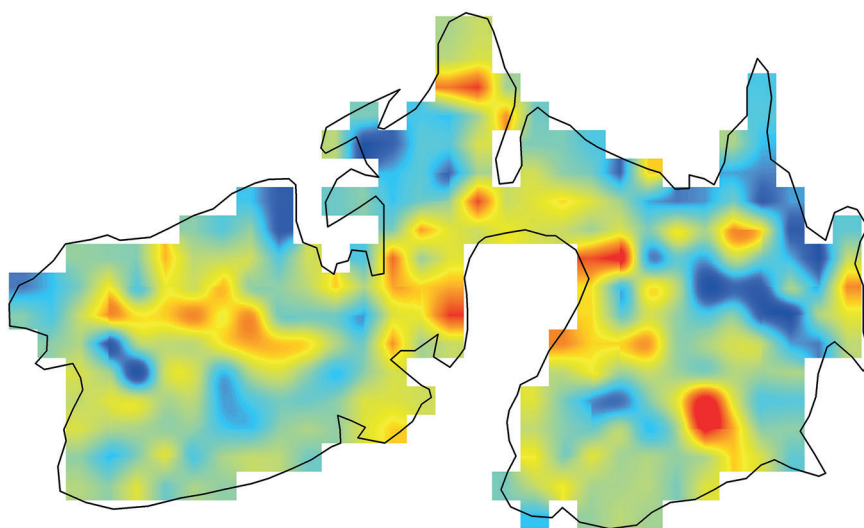


Рис. 2. Деформация поверхности ледника Баркрак Средний, интервал съёмки один год: понижение до -100 см, повышение до $+98$ см, в среднем -11 см

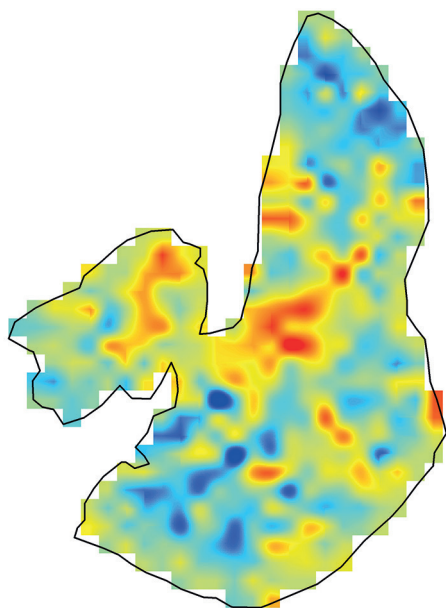


Рис. 3. Деформация поверхности ледника Пахтакор, интервал съёмки один год: понижение до -152 см, повышение до $+90$ см, в среднем -19 см

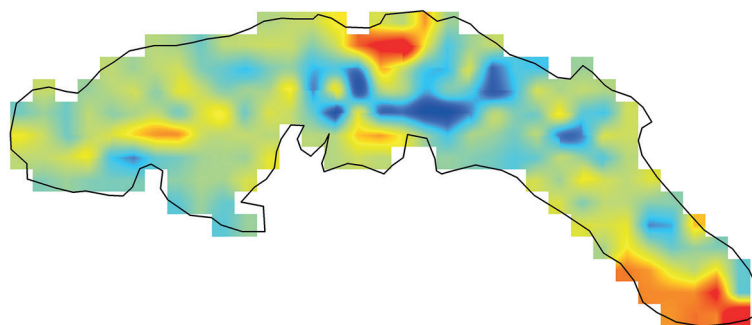


Рис. 4. Деформация поверхности ледника Текешсай, интервал съёмки один год: понижение до -84 см, повышение до $+96$ см, в среднем -16 см

Возможно также, что влияние приливных сил при съёмке высокогорной территории недостаточно корректно скомпенсировано на этапе уточнения орбиты Sentinel-1A, так как выявлена незначительная связь деформации с высотой стояния Луны над районом исследования. Одной из возможных причин могут быть тектонические процессы, в связи с выявленными аномальными блоковыми участками деформации поверхности земли недалеко от ледника Баркрак Средний. Вопрос различия в средних значениях деформации поверхности ледников при интервале съёмки в 12 дней и 1 год при схожих значениях когерентности имеет дискуссионный характер и требует дальнейшего изучения.

Выводы

В настоящей работе выполнена оценка вертикального изменения поверхности трёх ледников бассейна реки Пскем, на которых проводятся гляциологические наблюдения, методами радиолокационной космической съёмки нисходящей орбиты Sentinel-1A. На основе данных отдельных интерферометрических пар Sentinel-1 и продуктов интерферометрической обработки ASF DAAC Nup3 2024 были проведены расчёты деформации поверхности ледников с интервалом съёмки 12 дней и 1 год.

Для вычисления накопленной деформации за каждый год наблюдений и в сумме осуществлялось последовательное суммирование деформации по 112 парам 12-дневной съёмки с 2021 по 2024 г. и по годовой съёмке с 2015 по 2024 г.

Оптимизация расчётов в методе SBAS заключалась в выборе единого стабильного отражателя — контрольной точки, к которой были привязаны все интерференционные пары непрерывной съёмки, и в проведении атмосферной коррекции для всех исследуемых пар.

Критериями выбора отражателя были максимальная когерентность и близость к рассматриваемым ледникам. Приведённая методика позволила получить оценку накопленной деформации, отображающей чередования оседания и поднятия ледников за разные периоды.

При сравнении результатов расчёта деформации с наземными наблюдениями выявлено, что использование 12-дневной съёмки возможно только в летний период, при отсутствии снега на поверхности. Деформация поверхности ледников, рассчитанная с интервалом съёмки один год, с августа 2017 по август 2024 г., показала наилучшую согласованность с наземными данными для большинства лет наблюдений. Увеличение ряда наблюдений позволит в дальнейшем усовершенствовать методику оценки изменения высоты поверхности ледников за разные периоды и обосновать факторы, влияющие на динамику деформации их поверхности.

Работа выполнена в рамках проекта IL-5221091352, финансируемого Агентством инновационного развития Республики Узбекистан.

Литература

1. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В. Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. в Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2018–2023 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 3. С. 3–12. DOI: 10.31857/S0205961423030090.
2. Геткер М. И. Методические рекомендации по определению характеристик режима снежного покрова в горах Средней Азии. Ташкент: САНИГМИ, 1988. 47 с.
3. Каталог ледников СССР. Т. 14. Вып. 3. Ч. 3, 4. Л.: Гидрометеиздат, 1968.
4. Петров М., Сакс Т., Акбаров Ф. и др. Наблюдения баланса массы ледника Баркрак Средний (Западный Тянь-Шань), как часть глобального мониторинга криосферы проводимого WGMS (Всемирная служба мониторинга ледников) // Криосфера. 2021. № 1–2 (1). С. 45–52.
5. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 154 с.
6. Семакова Э. Р., Семаков Д. Г. О возможности использования методов дистанционного зондирования Земли в проведении гляциологических расчётов для горных районов Узбекистана // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 2. С. 185–199. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-2-185-199.
7. Racoviteanu A. E., Paul F., Raup B. et al. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land and Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA // Annals of Glaciology. 2009. V. 50. Iss 53. P. 53–69. DOI: 10.3189/172756410790595804.
8. Zhang L., Dai K., Deng J. et al. Identifying potential landslides by Stacking-InSAR in southwestern China and its performance comparison with SBAS-InSAR // Remote Sensing. 2021. V. 13. Article 3662. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>.

Assessment of glacier surface deformation in the Pskem River basin using Sentinel-1A data

E. R. Semakova, M. G. Potorjinskiy

*Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences
Tashkent 100052, Uzbekistan
E-mail: ella9sem@gmail.com*

Remote sensing techniques are an effective way to monitor changes in the state of glaciers located in hard-to-reach high mountain areas. An analysis of surface elevation changes was carried out throughout Sentinel-1 acquisitions for three glaciers in the Pskem River basin, Western Tien-Shan, where glaciological expeditionary observations are held (Barkrak Sredniy, Pakhtakor, Tekeshsay glaciers). The DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) and SBAS (Small BAseline Subset) methods were used. Processing of individual pairs of SAR images by the DInSAR method was carried out by the SNAP (SeNtinel Application Platform) software. The SBAS method used ASF DAAC HyP3 (Alaska Satellite Facility, Distributed Active Archive Center, Hybrid Pluggable Processing Pipeline) 2024 interferometric processing products. The glacier surface deformation was calculated from August 2021 to August 2024 with a 12-day acquisition interval and from 2015 to 2024 with a 1-year interval. For each interference pair, the deformation was corrected considering the GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service) atmospheric correction and normalized to a single reference point with the maximum coherence value of the entire sample of images. These procedures allowed us to obtain the most reliable results on cumulative deformation. Twelve-day alternations of glacier subsidence and uplift in summer depend on the accompanying meteorological conditions, glacier creep and topography of the subglacial bed. The yearly acquisitions allowed us to compare the measured deformation of the glacier surface with ground-based observations.

Keywords: Sentinel-1 data, glaciers, Uzbekistan mountains, SBAS, surface deformation, Pskem River basin

Accepted: 07.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-269-275

References

1. Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Anomalous geodynamics before the 2023 earthquake in Turkey according to radar interferometry 2018–2023, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 3, pp. 3–12 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423030090.
2. Getker M.I., *Methodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu kharakteristik rezhima snezhnogo pokrova v gorakh Srednei Azii* (Methodical recommendations for determining the characteristics of the snow cover regime in the mountains of Central Asia), Tashkent: SANIGMI, 1988, 47 p. (in Russian).
3. *Katalog lednikov SSSR* (Catalogue of glaciers of the USSR), V. 14, Iss. 3, Pt. 3, 4, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968 (in Russian).
4. Petrov M., Saks T., Akbarov F. et al., Observations of the mass balance of the Barkrak Sredniy Glacier (Western Tien Shan), as part of the global monitoring of the cryosphere conducted by WGMS (World Glacier Monitoring Service), *Cryosphere*, 2021, No. 1–2 (1), pp. 45–52 (in Russian).
5. *Rukovodstvo po sostavleniyu Kataloga lednikov SSSR* (Guide to compiling the Catalogue of glaciers of the USSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, 154 p. (in Russian).
6. Semakova E.R., Semakov D.G., On a possibility to use the remote sensing techniques for glaciological analysis in mountain regions of Uzbekistan, *Ice and Snow*, 2017, V. 57, No. 2, pp. 185–199 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2017-2-185-199.
7. Racoviteanu A.E., Paul F., Raup B. et al., Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land and Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA, *Annals of Glaciology*, 2009, V. 50, Iss. 53, pp. 53–69, DOI: 10.3189/172756410790595804.
8. Zhang L., Dai K., Deng J. et al., Identifying potential landslides by Stacking-InSAR in southwestern China and its performance comparison with SBAS-InSAR, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Article 3662, <https://doi.org/10.3390/rs13183662>.