

Развитие склоновых процессов в головной части Сарезского озера в 2023 году по данным космической радиолокационной интерферометрии

Л. Н. Захарова¹, А. И. Захаров¹, А. Л. Стром²

¹ *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

² *Научно-исследовательский институт энергетических сооружений — филиал АО «Институт Гидропроект», Москва, 123993, Россия
E-mail: strom.alexandr@yandex.ru*

Работа посвящена оценке динамики оползнеопасных склонов Сарезского озера вблизи Усойского завала в Таджикистане. Проведена обработка данных радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1 Европейского космического агентства, полученных с февраля 2023 г. по февраль 2024 г. В результате выявлены смещения как на левом, так и на правом берегу озера. Для определения компонент полного вектора смещения использованы данные с восходящего и нисходящего витков спутника. Учтено влияние тропосферы на интерферометрическую фазу. Применены два способа восстановления полного вектора смещения: первый предполагает отсутствие смещений в направлении север-юг, второй — преимущественное направление смещения по градиенту склона с возможностью небольших отклонений в вертикальной плоскости. Отмечены различающиеся детали в картах смещений, полученных в результате применения этих двух подходов. Оценена скорость смещений, достигающая 243 и 169 мм/год на правом и левом оползневых склонах соответственно. Отмечена стабильность поверхности Усойского завала на протяжении всего годичного периода. Сделан вывод о необходимости пристального внимания к этой территории и проведения дальнейших измерений.

Ключевые слова: оползни, Сарезское озеро, радиолокаторы с синтезированной апертурой, РСА, радиолокационная интерферометрия, дифференциальная интерферометрия, оценка смещений

Одобрена к печати: 21.11.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-43-55

Введение

Сарезское озеро на Памире образовалось в 1911 г. в результате перекрытия долины реки Мургаб сейсмогенным Усойским завалом объёмом 2,2 км³ и является крупнейшим современным завальным озером с объёмом около 16 км³ и максимальной глубиной около 500 м. В настоящее время завальная плотина считается устойчивой, так как сохраняется баланс между количеством воды, поступающей в озеро с одной стороны, и фильтрацией через завал и испарением с другой, исключая перелив через плотину в обозримом будущем при сохранении этого баланса.

Тем не менее Сарезское озеро всё же представляет собой потенциальную угрозу для сотен тысяч людей, проживающих в долинах рек Бартанг, Пяндж и Аму-Дарьи. В качестве одной из основных причин гипотетически возможного прорыва плотины рассматривается обрушение большого объёма скальных грунтов в озеро в результате крупного оползня с образованием волны, способной перехлестнуть через гребень плотины в её тыловой части, где поверхность завала возвышается над уровнем озера всего примерно на 35 м и, возможно, привести к её размыву. Ещё в 1968 г. было высказано предположение о наличии крупного так называемого Правобережного оползня объёмом в сотни миллионов кубометров примерно в 5 км от Усойского завала на склоне, возвышающемся над уровнем озера более чем на 1,3 км (Пославский, 1968; Шеко, 1968).

Однако из-за труднодоступности района и сложности и дороговизны проведения здесь инженерных изысканий вопрос о наличии этого оползня, точнее, о возможности крупного обрушения на этом участке, об объёме такого обрушения и, соответственно, о параметрах возможной волны вплоть до настоящего времени является дискуссионным. Ряд исследователей (Лим, Акдодов, 1998; Шеко, 1968) полагали, что на склоне происходят деформации, которые могут привести к единовременному катастрофическому обрушению, в то время как другие (например, (Ишук, 2013)) считают эту проблему надуманной, а формы рельефа, выявленные на правом борту долины, связывают с действием ледника, когда-то в прошлом проходившего по долине реки Мургаб.

За последние годы в районе Сарезского озера произошло два сильных землетрясения: 07.12.2015 с магнитудой $M_w = 7,2$ и эпицентром вблизи хвостовой части озера, в 45–50 км от Усойского завала, и 23.02.2023 с магнитудой $M_w = 6,9$ и эпицентром примерно в 60 км к юго-востоку от озера. Первое из них привело к явной активизации оползневых процессов на левом берегу озера, на крутом склоне плато Марджанай высотой около 600 м над уровнем озера в 1–2 км от края Усойского завала. Признаки такой активизации были выявлены при визуальном обследовании, проведённом сотрудниками унитарного предприятия «Южная гидрогеологическая экспедиция» (Ишук, Стром, 2016). В то же время сведений об активизации оползневых процессов на правом борту долины, в том числе на участке правобережного оползня, при этом землетрясении не поступало.

Наблюдение за состоянием окрестностей Сарезского озера, в первую очередь самого Усойского завала и левого и правого береговых склонов, возвышающихся над головной частью этого природного водохранилища, проводится на протяжении длительного времени различными наземными и дистанционными средствами. Начало наземным наблюдениям за развитием оползневых процессов на береговых склонах было положено, вероятно, в 1967 г., когда на правом берегу озера на высоте 4000–4300 м на протяжении до 2 км были обнаружены трещины (рис. 1) и было сделано предположение, что они являются реальными предвестниками возможного схода грандиозного оползня (Пославский, 1968; Шеко, 1968).

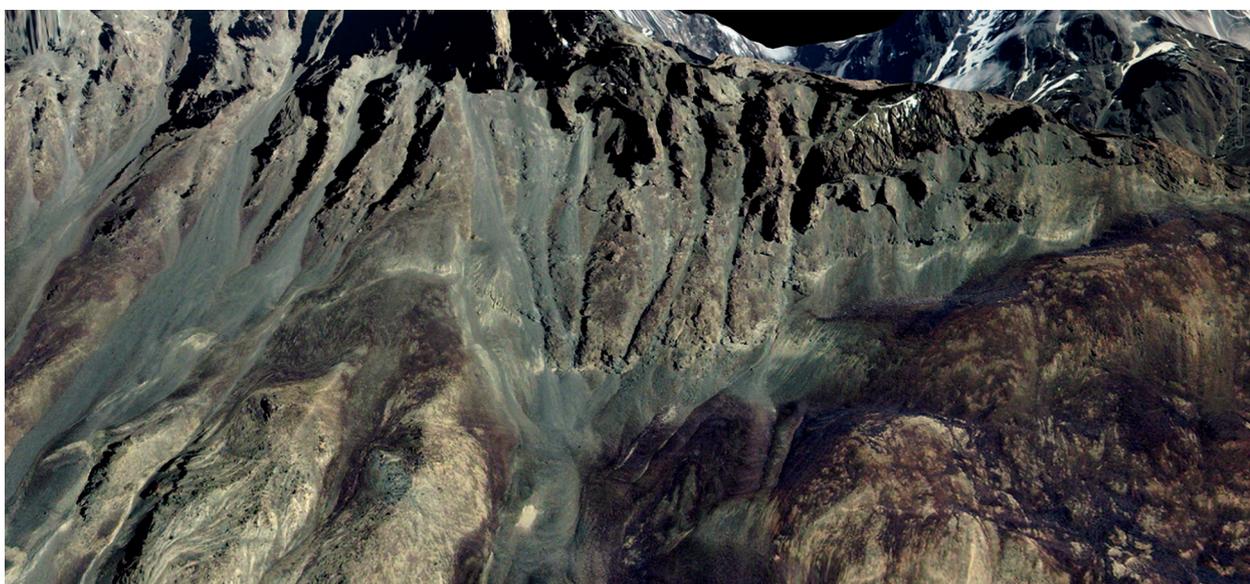


Рис. 1. Мелкие уступы на правом борту Сарезского озера на отметках 4400–4500 м. Перспективное изображение Google Earth. Протяжённость представленного участка около 1700 м

С развитием космических радиолокационных средств дистанционного зондирования стало возможным картографировать обширные территории земной поверхности с высокой пространственной детальностью и обнаруживать методами радиолокационной интерферометрии мелкомасштабные смещения отражающей поверхности. Многочисленные публика-

ции на тему применения космической радиолокационной интерферометрии для наблюдения динамики земных покровов берут начало со статьи 1989 г. (Gabriel et al., 1989). Первой работой на тему слежения за оползневыми процессами, вероятно, стал доклад, сделанный в 1995 г. французскими исследователями по результатам обработки данных космического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) ERS-1 (Achache et al., 1996).

Применение методов радиолокационной интерферометрии для мониторинга состояния береговых склонов Сарезского озера впервые описано в статье П. Дроза с соавторами в 2008 г. (Droz et al., 2008). Эти авторы использовали снимки РСА со спутника Envisat, сделанные в период с 2003 по 2006 г. Из-за особенностей геометрии съёмки (на нисходящем витке орбиты с восточной стороны) измерения подвижек поверхности были сделаны только для правобережного оползня. Скорость радиального смещения стабильно отражающих точек на поверхности оползня была в пределах 20–120 мм/год, что согласуется с одновременно проводившимися измерениями на основе данных навигационной системы GPS (*англ.* Global Positioning System).

Серия снимков РСА Sentinel-1 за период с сентября 2017 г. по сентябрь 2019 г., сделанных и с нисходящего, и с восходящего витков орбиты, использована в работе (Grebby et al., 2021) для измерения радиальных смещений поверхности оползневых склонов на обоих берегах озера и на теле Усойского завала на годичном интервале времени. Оказалось, что на поверхности завала наблюдаются сезонные циклические смещения в пределах 5–10 мм, а скорость радиального смещения правобережного склона достигает 105 мм/год. Можно предположить, что циклические колебания уровня поверхности завала связаны с ежегодными колебаниями уровня озера величиной около 15 м (Ischuk, 2011).

В 2024 г. в журнале *Landslides* была опубликована статья (Nardini et al., 2024), в которой показано, что по результатам анализа радиолокационных спутниковых данных за период с 2015 по 2020 г., т.е. в основном уже после землетрясения 7 декабря 2015 г., отчётливо проявились оползневые смещения и на левом и на правом бортах долины. Благодаря совместной обработке интерферометрических измерений радиальных смещений с восходящего (съёмка с запада) и нисходящего (съёмка с востока) витка были выделены вертикальные и горизонтальные компоненты смещений правобережного и левобережного оползней. Максимальная радиальная скорость отдельных участков поверхности правобережного оползня достигала 250 мм/год, т.е. примерно в два раза выше, чем ранее, а левобережного — до 240 мм/год. Распределение направлений векторов смещения поверхности вдоль склонов свидетельствовало о смешанном типе движения на этих участках (вращение и поступательное скольжение вниз по склону).

Использованные данные и метод (радиолокационная интерферометрия)

В развитие цитированных выше работ нами предпринята попытка исследования особенностей недавней динамики окрестностей озера Сарез вблизи Усойского завала методами радиолокационной интерферометрии на годичном интервале, охватывающем землетрясение в феврале 2023 г. Материалом для данного исследования служат радиолокационные снимки РСА Европейского космического агентства Sentinel-1, сделанные с интервалом 12 дней с восходящих витков в период с 3 февраля 2023 г. по 29 января 2024 г. и с нисходящих витков с 9 февраля 2023 г. по 4 февраля 2024 г. Формирование дифференциальных интерферограмм и карт когерентности для 60 соседних пар снимков Sentinel-1A было выполнено с помощью веб-ресурса ASF (*англ.* Alaska Satellite Facility) (https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/insar_product_guide/) с использованием пакета интерферометрической обработки Gamma (Hogenson et al., 2020).

Интерферометрическая разность фаз сигналов двух радиолокационных измерений состоит из нескольких составляющих. Объединяя разные подходы к выделению наиболее значимых составляющих интерферометрической фазы $\Delta\phi$ (Ferretti et al., 2000; Guneriusen

et al., 2001), можно назвать следующие: компонента $\Delta\varphi_{\text{топо}}$, зависящая от рельефа; компонента $\Delta\varphi_d$, отражающая динамику поверхности за время между съёмками; компонента $\Delta\varphi_a$, равная набегу фазы при распространении сигнала в атмосфере; компонента $\Delta\varphi_s$, соответствующая дополнительному набегу фазы в слое снега на поверхности; случайная фазовая составляющая $\Delta\varphi_n$, порождаемая объёмной декорреляцией, временной декорреляцией и тепловым шумом, а также неизвестная начальная фаза $\Delta\varphi_0$:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{топо}} + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_s + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_0. \quad (1)$$

Поскольку интерферограмма содержит суммарное значение $\Delta\varphi$, для оценки динамики поверхности между съёмками необходимо вычестить все остальные слагаемые.

Исключение фазовой составляющей, относящейся к рельефу, происходит за счёт применения цифровой модели рельефа. Сервис ASF использует с этой целью глобальную цифровую модель рельефа с 30-метровым разрешением, которая называется Copernicus DEM GLO-30 (<https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>). Атмосферная коррекция интерферометрических измерений проведена с применением веб-сервиса GACOS (англ. Generic Atmospheric Correction Online Service) (<http://www.gacos.net/>). Следует отметить, что GACOS (Yu et al., 2017, 2018a, b) в целом хорошо компенсирует дополнительный набег фазы, вызванный атмосферными неоднородностями, однако ввиду 6-часового шага по времени в используемой погодной модели возможна неполная компенсация фазовой компоненты $\Delta\varphi_a$, поскольку параметры тропосферы могут меняться быстро, особенно в условиях горного рельефа. Составляющая $\Delta\varphi_s$, относящаяся к снегу, при оценке смещения оползневых поверхностей в данной работе не учитывалась, так как на достаточно крутых (около 30°) склонах, окружающих озеро, снег задерживается редко. При этом вклад снега в интерферометрическую фазу хорошо прослеживается на более пологих ландшафтах, расположенных несколько далее от озера, как будет более подробно указано ниже. Влияние не поддающейся прямым измерениям составляющей $\Delta\varphi_n$ может быть оценено при помощи вычисления интерферометрической когерентности, показывающей степень достоверности интерферометрических измерений: при достаточно высокой когерентности $\Delta\varphi_n$ мала и её влиянием можно пренебречь. Начальная фаза $\Delta\varphi_0$ приравнивалась к фазе неподвижных участков поверхности для последующей коррекции.

Объект измерения, т.е. фазовая составляющая, описывающая динамику поверхности $\Delta\varphi_d$, связана с радиальным смещением участка отражающей поверхности (проекцией его реального смещения на линию визирования радиолокатора) Δr_d за время между наблюдениями так (Gabriel et al., 1989):

$$\Delta r_d = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_d,$$

где λ — длина волны радиолокатора.

Радиальные смещения

На *рис. 2* (см. с. 47) представлено накопленное за 360 дней радиальное смещение для восходящего и нисходящего витка. Оползневые склоны, на которых детектировано смещение, отмечены окружностями: меньшая охватывает левобережный склон, большая — правобережный. На восходящем витке хорошо заметно удаление (потемнение) левобережного оползневомго склона от спутника-носителя по сравнению с неподвижным более светлым окружением, тогда как на нисходящем витке эта разница менее заметна, особенно в западной части левобережного склона. Правобережный склон на восходящем витке сильно зашумлён, однако в целом на нём преобладают светлые тона по сравнению с окружением, что в выбранной схеме обработки означает приближение к спутнику. На съёмке с нисходящего витка правобережный склон темнее окружения, что соответствует удалению от радиолокатора, освещающего местность с запада. Анализ геометрии съёмки и градиентов склонов показывает, что знаки разности фаз при смещении вниз вдоль склонов должны распределяться в точности

так, как описано выше: положительный — при съёмке правого берега с восходящего витка и отрицательный — при съёмке его же с нисходящего витка, а также левого берега с обоих направлений. Таким образом, накопленные за год смещения на обеих сериях съёмок демонстрируют преимущественное смещение вдоль склонов вниз.

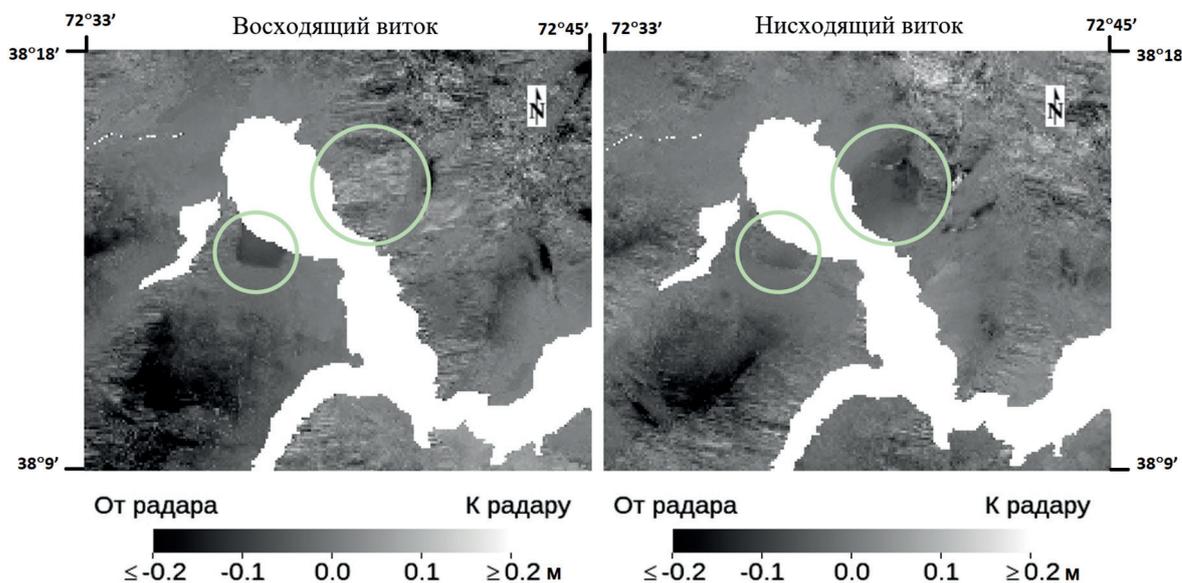


Рис. 2. Суммарное радиальное смещение за год (в м) по измерениям на восходящем и нисходящем витке

Помимо отличий от средне-серого тона на берегах водохранилища, на рис. 2 хорошо заметны большие тёмные образования в юго-западной части фрагмента: здесь фазовые отклонения на обоих витках говорят о дополнительном фазовом набеге, который, будучи проинтерпретирован как смещение, свидетельствовал бы о значительных подвижках (более 20 см/год). Однако это место представляет собой закрытую с трёх сторон скальными стенами чашу, в которой накапливается снег, изменение уровня которого от съёмки к съёмке также влияет на интерферометрическую фазу (компонента $\Delta\varphi_s$ в формуле (1)). Более длинный путь сквозь снежный покров при этом у сигнала с восходящей орбиты оказывается у западной стенки чаши, а у сигнала с нисходящего витка — у восточной, там сосредоточены наиболее тёмные тона, что хорошо видно на рис. 2.

Северо-восточный угол фрагментов на рис. 2 сильнее зашумлён, чем остальная часть, что говорит о менее надёжной фазовой информации в этой области фрагментов изображения вследствие сильной временной декорреляции.

На рис. 3 (см. с. 48) для небольшой области в верхней части левобережного склона (на врезке выделена жёлтым квадратом величиной 3×3 элемента изображения, соответствует участку местности размером приблизительно 80×80 м) представлен пример накопления радиальных смещений по данным с восходящего витка в течение года. Линиями разных цветов показаны все девять точек области, а также их среднее (крупный красный пунктир) и его линейный тренд (мелкий красный пунктир). Суммарная величина смещения за год составляет от 8 до 9 см в этих девяти точках, а линейное приближение даёт усреднённую радиальную скорость около 7 см/год для этой части склона. Начальный момент для всех измерений — 3 февраля 2023 г., на горизонтальной оси отмечены конечные точки для 30 нарастающих интервалов (первый составляет 12 дней, второй — 24 дня и т.д.). Таким образом, точка на графике соответствует накопленному с 3 февраля радиальному смещению, а отрезок между соседними точками показывает изменение этой величины за 12 дней. Момент землетрясения 23.02.2023 попадает во второй из 12-дневных интервалов (15–27 февраля), и мы видим, что радиальное смещение за эти 12 дней составляет около 1 см, и в следующие

12 дней (27 февраля – 11 марта) около 7 мм, тогда как за самый первый и за три последующих (четвёртый, пятый и шестой интервалы, с 11 марта по 16 апреля) величина смещений за 12 дней колеблется около первых миллиметров, почти повторяя линию тренда. Так могла проявиться локальная во времени активизация склоновых процессов, вызванная землетрясением. Однако наверняка утверждать это нельзя, поскольку на графике присутствуют и другие выбросы, сравнимые по величине и даже превосходящие те, что охватывают интервал времени, в течение которого произошло землетрясение. Наиболее достоверен общий тренд, полученный в результате накопления значений за весь год, так как при суммировании выбросы значений, происходящие за счёт случайных факторов, сглаживаются.

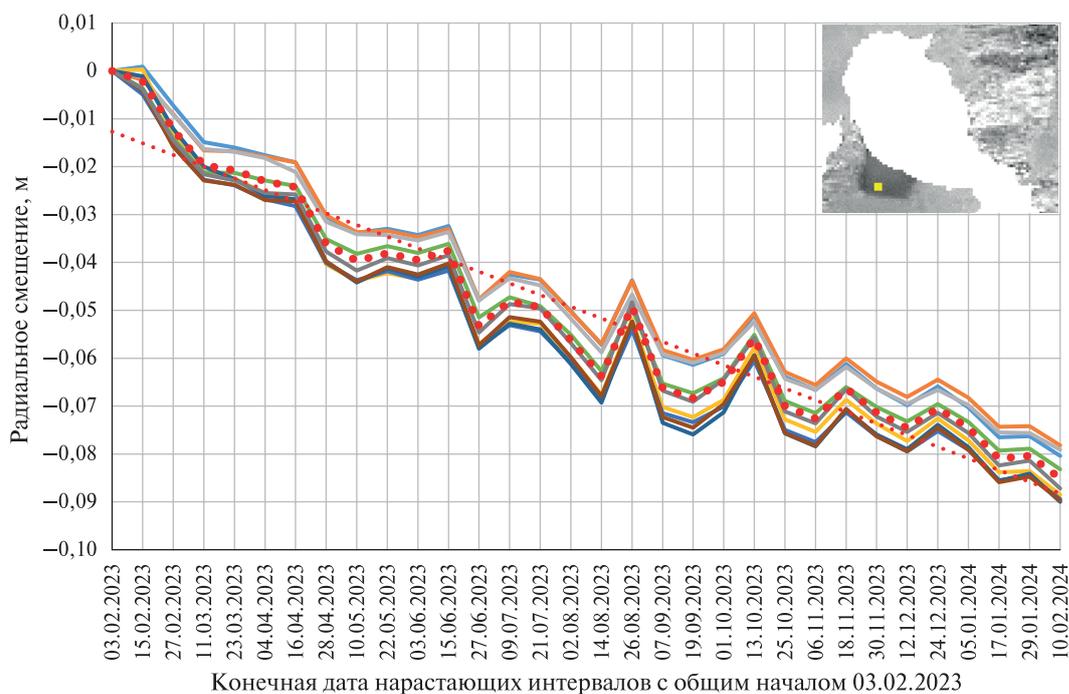


Рис. 3. Накопление радиальных смещений за год в девяти соседних точках левобережного склона (образуют квадрат размером 3×3 элемента изображения, выделенный жёлтым цветом на врезке) по данным с восходящего витка; сплошные линии разного цвета — измеренное смещение в каждой из девяти точек, крупный пунктир — их среднее, мелкий пунктир — линейный тренд среднего

Отдельный момент, требующий обсуждения, — резкие пики вверх на рис. 3 (например, 26 августа и 10 октября), которые могут быть интерпретированы как смещение в сторону, противоположную общему тренду. Такие резкие выбросы интерферометрической фазы, являющейся основой для вычисления смещений, характерны для тропосферных неоднородностей, которые не может полностью компенсировать атмосферная модель ввиду недостаточности разрешения по времени или по причине недостаточной чувствительности к турбулентной составляющей атмосферной задержки сигнала, как это показано, например, в работе (Волкова и др., 2024). Накопление смещений на длинной цепочке 12-дневных интервалов позволяет сгладить влияние таких выбросов, поскольку при суммировании вклад, созданный атмосферной неоднородностью в одну и ту же дату, войдёт дважды, но с противоположными знаками, и, таким образом, эти слагаемые взаимно уничтожатся, в отличие от фазы, вызванной реальным смещением, которое происходит преимущественно в одном и том же направлении. Исходя из этого, накопление смещений в цепочке последовательных интерферограмм — эффективный способ обнаружения долгосрочных трендов и уменьшения влияния атмосферных и других помех.

Возвращаясь к анализу заметных смещений за 12-дневный интервал, охватывающий землетрясение 23.02.2023 на графике (см. рис. 3), можно отметить, что ни до, ни после этого

не было резкого выброса вверх, близкого по величине к наблюдаемому резкому скачку вниз на 1,5 см, следовательно, маловероятно, что этот и соседний скачок вниз (около 1 см) вызваны атмосферными неоднородностями, неучтённым моделированием атмосферных поправок. Таким образом, предположение о сейсмогенном происхождении этих смещений вполне правомерно.

Разделение смещений на горизонтальные и вертикальные

Особенность радиолокационных спутниковых наблюдений с восходящей и нисходящей орбиты заключается в получении измерений с почти противоположных направлений относительно зоны съёмки, благодаря чему совместная обработка данных о радиальных подвижках отражающей поверхности с восходящей (наблюдение с запада на восток) и нисходящей (наблюдение с востока на запад) трасс позволила выделить горизонтальную (восток-запад) и вертикальную (верх-низ) компоненты смещений.

Поскольку орбиты современных космических носителей радиолокаторов околополярные, трасса полёта незначительно отклоняется от меридионального направления на большей части орбиты. При съёмке озера Сарез аппаратом Sentinel-1 это отклонение на обоих витках составляет около 10° . При такой геометрии съёмки интерферометрическая фаза малочувствительна к смещениям в направлении север-юг, поэтому стандартное разложение с использованием данных с противоположных витков орбиты оперирует только двумя направлениями: запад-восток и верх-низ в предположении нулевого смещения в направлении север-юг (Hu et al., 2014).

На *рис. 4* представлены фрагменты такого разложения, полученного по накопленным смещениям, которые показаны выше на *рис. 2*. На горизонтальных смещениях в направлении восток-запад видно отличие обоих склонов от неподвижного окружения, причём с противоположными знаками, что соответствует их пространственной ориентации: движение вниз по склону на левом берегу происходит в северо-восточном направлении, давая положительный вклад в эту компоненту, а на правом — в юго-западном и западном, что приводит к отрицательной величине проекции вектора смещения на горизонтальную ось восток-запад. Карта вертикальных смещений на обоих склонах демонстрирует отрицательные значения, что ожидаемо соответствует смещению вниз, причём на левом берегу они более выражены по сравнению с правым. При этом на верхних частях обоих склонов вертикальная проекция смещения сильнее, чем на нижних, что говорит о более крутом направлении смещений в верхних частях склонов и более пологом у воды, что может указывать на движение, характерное для оползней вращения, когда верхняя часть массива оседает, а нижняя — выдвигается вперёд. Движения на правом борту долины, по-видимому, имеют более сложный характер.

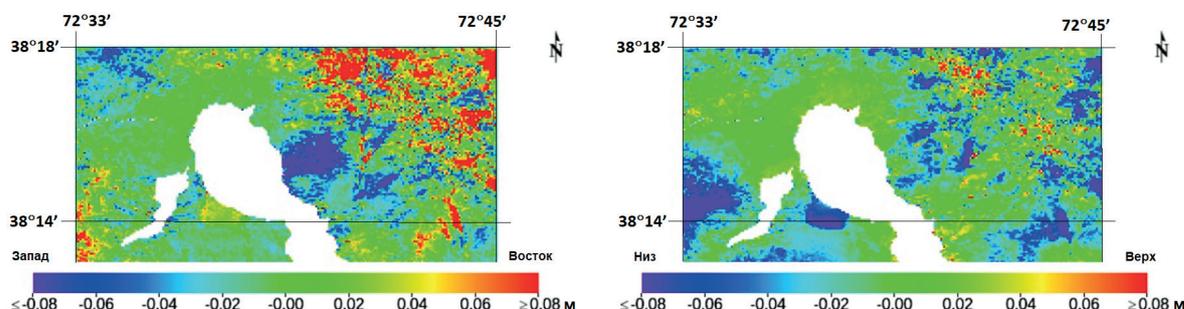


Рис. 4. Разделение радиальных измерений на горизонтальную (запад-восток) и вертикальную (верх-низ) составляющую

Из-за сниженной когерентности во многих 12-дневных парах часть полученных величин смещения ненадёжна (см., например, зашумлённый правый верхний угол *рис. 4*, упомянутый

также при обсуждении *рис. 2*). Для выявления наиболее достоверных оценок смещения была проведена оценка величин интерферометрической когерентности. На *рис. 5* на изображение Google Earth наложены только те элементы изображения смещений, в которых во всех парах восходящего и нисходящего витка когерентность не ниже 0,3. Таким образом, из двух оползнеопасных склонов наиболее достоверные измерения получены в центральной части левобережного. Стоит отметить также надёжность измерений на северном берегу головной части водохранилища: здесь площадь фрагментов с хорошей когерентностью максимальна, что видно на *рис. 5*: самые большие пятна находятся здесь и окрашены зелёным цветом, соответствующим околонулевым измеренным смещениям.

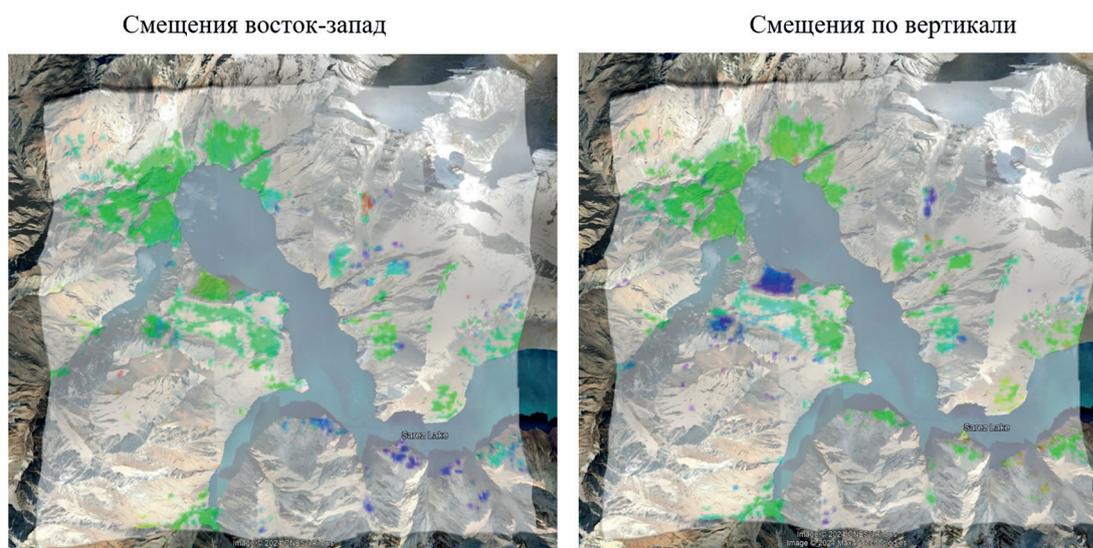


Рис. 5. Разделение радиальных измерений на горизонтальную (запад-восток) и вертикальную (верх-низ) составляющую. Использованы данные с уровнем интерферометрической когерентности не ниже 0,3. Подложка — изображение Google Earth

Разделение смещений на три пространственные компоненты

Обсуждаемые в предыдущем разделе величины смещения в горизонтальном и вертикальном направлении вычислены в предположении нулевого смещения в направлении север-юг. Такое ограничение может привести к искажениям для тех участков местности, где имеется заметная составляющая смещения в меридиональном направлении. Для компенсации этих искажений возможно альтернативное предположение: смещение происходит преимущественно вдоль локального направления вниз по склону. С помощью этой техники получены приведённые на *рис. 6* и *7* (см. с. 51) профили смещений вдоль лево- и правобережного склона соответственно. На обоих профилях заметна особенность, указанная выше при анализе *рис. 4*: чем ниже точка на склоне, тем более близок к горизонтали вектор смещения. При этом правый берег более зашумлён, поэтому вычисленные смещения ведут себя менее согласованно по сравнению с левым, особенно в верхней части профиля на *рис. 7*.

Результаты применения метода, предполагающего преимущественное смещение вдоль склонов, показаны на *рис. 8* (см. с. 52): приведены три пространственные составляющие (движение в направлении запад-восток, север-юг и верх-низ), а также абсолютная величина вычисленного полного вектора смещения. Составляющая север-юг наименее достоверна из всех трёх компонент вектора смещения в тех местах, где склон ориентирован почти строго на север или на юг, поэтому возможны нереалистичные выбросы значений в положительную или отрицательную сторону. В тех же местах, где направление склона отличается от меридионального, учёт этой составляющей может внести коррективы в картину смещений, построенную в предположении нулевого смещения в направлении север-юг.

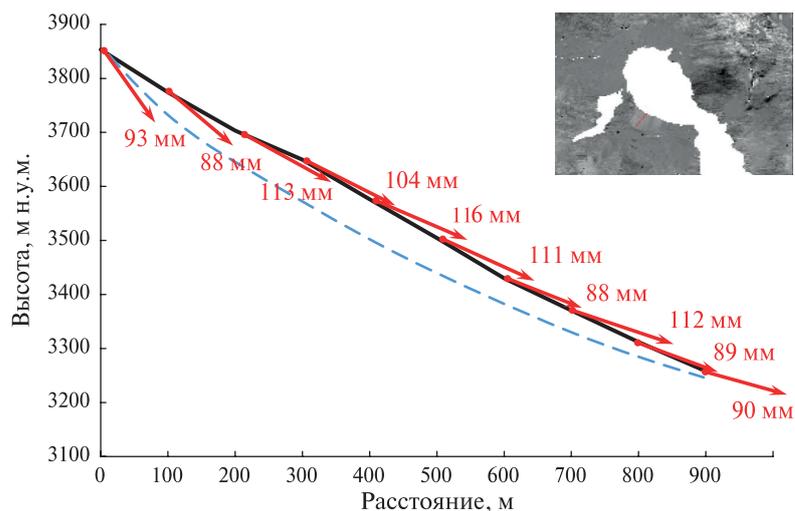


Рис. 6. Полные значения смещений на левом берегу в 10 точках профиля и их направления. Векторы смещений приведены в увеличенном масштабе. Штриховой линией обозначена возможная поверхность смещения. Врезка — расположение профиля

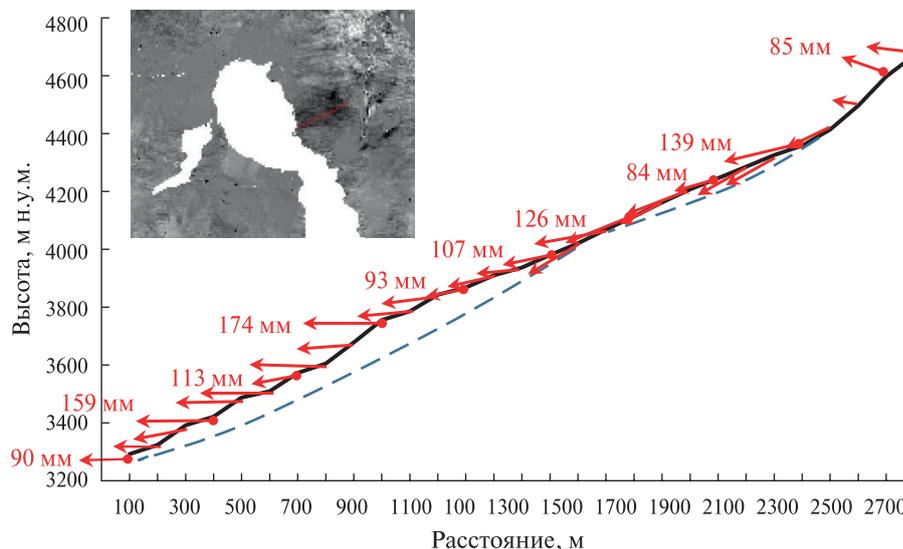


Рис. 7. Полные значения смещений на правом берегу в 29 точках профиля и их направления. Векторы смещений приведены в увеличенном масштабе. Штриховой линией обозначена возможная поверхность смещения. Врезка — расположение профиля

Так, сравнивая карты смещений на рис. 4 и 8, можно увидеть, что вертикальная составляющая в верхней части левобережного оползня на рис. 8 на меньшей площади достигает порогового значения -8 см (на вертикальных смещениях рис. 8 (внизу слева) на этом склоне почти нет тёмно-синего цвета, тогда как на рис. 4 (справа) тёмно-синее пятно занимает почти половину склона). Это происходит за счёт того, что в методе разложения, игнорирующем смещения в направлении сервер-юг (см. рис. 4), их влияние переносится на вертикальную компоненту. Таким образом, возможна переоценка вертикальной компоненты для склонов, ориентированных приблизительно на север, и недооценка её для склонов, ориентированных приблизительно на юг. Что касается компоненты смещения запад-восток, на её изображениях отличия на оползневых склонах для двух методов (рис. 4 (слева) и рис. 8 (вверху слева)) почти незаметны.

Таким образом, наблюдения в течение года демонстрируют подвижность и левобережного и правобережного склона, как показывает анализ модуля вектора смещения

(см. рис. 8 (внизу справа)). Обработка в предположении преимущественного направления смещения вниз по склону даёт оценку максимальной накопленной величины смещения около 16,9 см за год в верхней части левобережного склона и 10,3 см в среднем по этому склону. На правом берегу максимум накопленного за год локального смещения составляет 24,3 см, в среднем по склону — 10,5 см.

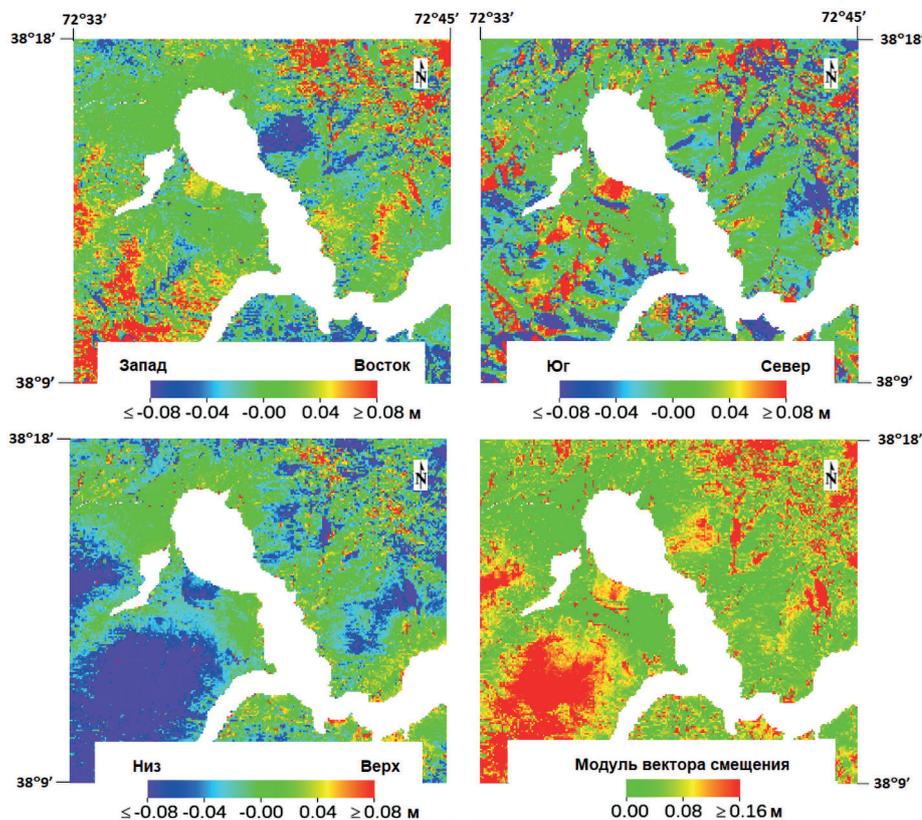


Рис. 8. Три пространственные составляющие (движение в направлении запад-восток, север-юг и верх-низ), а также абсолютная величина вычисленного полного вектора смещения

Заключение

Оценённые смещения свидетельствуют о продолжающихся смещениях склонов и на левом, и на правом борту долины головной части Сарезского озера в течение 2023 г. Измерения по левобережному склону являются наиболее надёжными, поскольку здесь интерферометрическая когерентность превышает порог 0,3 для всех использованных в обработке пар изображений.

Следует отметить, что землетрясение 23 февраля 2023 г. привело лишь к кратковременному ускорению склоновых процессов, в отличие от землетрясения 7 декабря 2015 г., при котором существенно активизировались процессы на левом борту долины, на склоне плато Марджанай. Это говорит о сложном характере влияния сейсмических колебаний на устойчивость берегов Сарезского озера.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами аналогичных исследований, описанных в работах (Droz et al., 2008; Grebby et al., 2021; Nardini et al., 2024). Они показывают, что и на левом, и на правом берегу Сарезского озера, в его головной части, действительно формируются крупные оползни.

Очевидно, что необходимо продолжать мониторинг состояния склонов на этих участках, в том числе методами спутниковой радиолокационной интерферометрии, с тем чтобы не пропустить возможную активизацию смещений, которая может привести к крупномас-

штабным обрушениям в озеро с образованием высоких волн, способных перехлестнуть через завал с трудно прогнозируемыми последствиями. Проведение съёмок в более длинноволновом диапазоне такими РСА, как например перспективным отечественным аппаратом «Кондор-ФКА» в S-диапазоне или японским радиолокатором PALSAR-3 в L-диапазоне, было бы предпочтительно в силу меньшего уровня временной декорреляции в этих диапазонах.

Необходимо также вернуться к рассмотрению вопроса о приведении озера в гарантированно безопасное состояние путём понижения его уровня с тем, чтобы даже при наиболее неблагоприятном развитии склоновых процессов на берегах озера исключить перелив через гребень Усойского завала с возможностью размыва тела завальной плотины.

Работа выполнена частично в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Волкова М. С., Михайлов В. О., Османов Р. С. Анализ эффективности применения глобальной погодной модели HRES (GACOS) для коррекции атмосферных помех в интерферометрических оценках полей смещений на примере вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 9–22. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22.
2. Ишук Н. Р. «Оползни» на берегах озера Сарез (Таджикистан) // Геориск. 2013. № 2. С. 48–60.
3. Ишук Н. Р., Стром А. Л. Геологические последствия землетрясения 7 декабря 2015 года на Сарезском озере // Геориск. 2016. № 3. С. 56–74.
4. Лим В. В., Акдодов Ю. Оползни Сареза. Душанбе: Дониш, 1998. 165 с.
5. Пославский В. В. Об одной катастрофе на Памире (История Сарезского озера) // Гидротехника и мелиорация. 1968. № 3. С. 98–116.
6. Шeko А. И. Оценка устойчивости Усойского завала и возможность прорыва Сарезского озера // Бюл. МОИП. Отдел геологический. 1968. Т. 43. № 4. С. 151–159.
7. Achache J., Fruneau B., Delacourt C. Applicability of SAR interferometry for monitoring of landslides // ERS applications. Proc. 2nd Intern. Workshop. 6–8 Dec. 1995, London. ESA SP-383. 1996. P. 165–168.
8. Droz P., Fumagalli A., Novali F., Young B. GPS and InSAR technologies: A joint approach for the safety of Lake Sarez // 4th Canadian Conf. Geohazards. 20–24 May 2008. Québec: Presse de l'Université Laval, 2008. P. 147–154.
9. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. No. 5. P. 2202–2212. DOI: 10.1109/36.868878.
10. Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1989. V. 94. Iss. B7. P. 9183–9191. DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.
11. Grebby S., Sowter A., Gee D. et al. Remote monitoring of ground motion hazards in high mountain terrain using InSAR: A case study of the Lake Sarez area, Tajikistan // Applied Sciences. 2021. V. 18. No. 11. Article 8738. DOI: 10.3390/app1188738.
12. Guneriusson T., Hogda K. A., Johnsen H., Lauknes I. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 10. P. 2101–2108. DOI: 10.1109/36.957273.
13. Hogenson K., Kristenson H., Kennedy J. et al. Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data: Computer software. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.4646138.
14. Hu J., Li Z. W., Ding X. L. et al. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review // Earth-Science Reviews. 2014. V. 133. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005.
15. Ischuk A. R. Usoi rockslide dam and Lake Sarez, Pamir Mountains, Tajikistan // Natural and Artificial Rockslide Dams. Lecture Notes in Earth Sciences / eds. Evans S. G., Hermanns R. L., Strom A., Scarascia-Mugnozza G. V. 133. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. P. 423–440. DOI: 10.1007/978-3-642-04764-0_16.
16. Nardini O., Confuorto P., Intriери E. et al. Integration of satellite SAR and optical acquisitions for the characterization of the Lake Sarez landslides in Tajikistan // Landslides. 2024. V. 21. P. 1385–1401. DOI: 10.1007/s10346-024-02214-y.

17. Yu C., Penna N. T., Li Z. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. V. 122. Iss. 3. P. 2008–2025. DOI: 10.1002/2016JD025753.
18. Yu C., Li Z., Penna N. T. (2018a) Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 204. P. 109–121. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.038.
19. Yu C., Li Z., Penna N. T., Crippa P. (2018b) Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. V. 123. Iss. 10. P. 9202–9222. DOI: 10.1029/2017JB015305.

Development of slope processes in the vicinity of the Sarez Lake dam in 2023 as viewed by spaceborne SAR interferometry

L. N. Zakharova¹, A. I. Zakharov¹, A. L. Strom²

¹ *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

² *Institute Hydroproject JSC, Moscow 123993, Russia
E-mail: strom.alexandr@yandex.ru*

The paper focuses on the assessment of slope dynamics on the banks of the Sarez Lake near the Usoi dam in Tajikistan. Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) data of European Space Agency have been processed for the time period since February 2023 till February 2024. Surface displacements were detected on both left and right banks of the lake. In order to extract the components of the full displacement vector, we used data from ascending and descending orbits of Sentinel-1. The influence of the troposphere on the interferometric phase was taken into account. Two approaches to full displacement vector estimation were used: the first one assumes zero North-South component of the displacement, the second one assumes the motion vector oriented generally in the slope direction with possible slight deflections in the vertical plane. Different details in the displacement maps created by using the two approaches are described. Maximal displacement velocities are estimated as 243 mm/year and 169 mm/year on the right and left slopes, respectively. The stability of the Usoi dam throughout the entire year-long period was demonstrated. It is concluded that this area needs to be closely monitored and further measurements are necessary.

Keywords: landslides, Sarez Lake, synthetic aperture radar, SAR, SAR interferometry, InSAR, differential InSAR, DInSAR, displacement assessment

Accepted: 21.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-43-55

References

1. Volkova M. S., Mikhailov V. O., Osmanov R. S., Analysing the efficiency of the HRES (GACOS) global weather model for correction of atmospheric noise in interferometric estimates of displacement fields on the example of volcanoes in Kamchatka, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 9–22 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22.
2. Ishchuk N. R., “Landslides” on the banks of the Lake Sarez (Tajikistan), *Georisk*, 2013, No. 2, pp. 48–60 (in Russian).
3. Ishchuk N. R., Strom A. L., Geological effects of the earthquake at the Sarez Lake on December 7, 2015, *Georisk*, 2016, No. 3, pp. 56–74 (in Russian).
4. Lim V. V., Akdodov Yu., *Opolzni Sarez* (Landslides of Sarez), Dushanbe: Donish, 1998. 165 p. (in Russian).

5. Poslavskii V. V., About one catastrophe in the Pamirs (History of Sarez Lake), *Gidrotekhnika i melioratsiya*, 1968, No. 3, pp. 98–116 (in Russian).
6. Sheko A. I., Assessment of the stability of the Usoi dam and the possibility of breaching the Sarez Lake, *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologicheskii*, 1968, V. 43, No. 4, pp. 151–159 (in Russian).
7. Achache J., Fruneau B., Delacourt C., Applicability of SAR interferometry for monitoring of landslides, *ERS Applications, Proc. 2nd Intern. Workshop, 6–8 Dec., 1995*, London, ESA SP-383, 1996, pp. 165–168.
8. Droz P., Fumagalli A., Novali F., Young B., GPS and InSAR technologies: A joint approach for the safety of Lake Sarez, *4th Canadian Conf. Geohazards, 20–24 May 2008*, Québec: Presse de l'Université Laval, 2008, pp. 147–154.
9. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, V. 38, No. 5, pp. 2202–2212, DOI: 10.1109/36.868878.
10. Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A., Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, V. 94, Iss. B7, pp. 9183–9191, DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.
11. Grebby S., Sowter A., Gee D. et al., Remote monitoring of ground motion hazards in high mountain terrain using InSAR: A case study of the Lake Sarez area, Tajikistan, *Applied Sciences*, 2021, V. 18, No. 11, Article 8738, DOI: 10.3390/app11188738.
12. Guneriusen T., Hogda K. A., Johnsen H., Lauknes I., InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, V. 39, No. 10, pp. 2101–2108, DOI: 10.1109/36.957273.
13. Hogenson K., Kristenson H., Kennedy J. et al., *Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data: Computer software*, 2020, DOI: 10.5281/zenodo.4646138.
14. Hu J., Li Z. W., Ding X. L. et al., Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review, *Earth-Science Reviews*, 2014, V. 133, pp. 1–17, DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005.
15. Ischuk A. R., Usoi rockslide dam and Lake Sarez, Pamir Mountains, Tajikista, In: *Natural and Artificial Rockslide Dams. Lecture Notes in Earth Sciences*, Evans S. G., Hermanns R. L., Strom A., Scarascia-Mugnozza G. (eds.), V. 133, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 423–440, DOI: 10.1007/978-3-642-04764-0_16.
16. Nardini O., Confuorto P., Intrieri E. et al., Integration of satellite SAR and optical acquisitions for the characterization of the Lake Sarez landslides in Tajikistan, *Landslides*, 2024, V. 21, pp. 1385–1401, DOI: 10.1007/s10346-024-02214-y.
17. Yu C., Penna N. T., Li Z., Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, V. 122, Iss. 3, pp. 2008–2025, DOI: 10.1002/2016JD025753.
18. Yu C., Li Z., Penna N. T. (2018a), Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 204, pp. 109–121, DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.038.
19. Yu C., Li Z., Penna N. T., Crippa P. (2018b), Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, V. 123, Iss. 10, pp. 9202–9222, DOI: 10.1029/2017JB015305.