

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 2224-5227

Volume 5, Number 315 (2017), 75 – 82

**Zh. Sh. Zhantayev, D. T. Shigayev, A. A. Kaldybayev,
S. M. Nurakynov, N. G. Breusov, G. B. Mamyrbek, S.N. Mukasheva**

Institute of Ionosphere of The National Center of Space Research and Technology, Kazakhstan, Almaty
snmukasheva@gmail.com

MONITORING OF THE TERRITORY OF THE CHARDARA HYDRO COMPLEX BASED ON SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY DATA

Abstract. In this paper, the results of the application of the technology of radar satellite interferometry for monitoring and estimating the vertical displacements of the territory of the Chardara hydro complex are presented. The hydro complex studied is located in the south of Kazakhstan near the city of Chardara [41°15'17"N; 67°58'09"E]. The satellite technology of synthetic aperture radar (SAR) in recent years has become a powerful tool for studying soil deformations and is an effective tool for assessing the operational reliability and safety of hydro complexes. The main result of differential interferometric processing is displacement maps. Interferometric processing of a large series (15-20) of radar images (Persistent Scatterers) allows to achieve submillimeter accuracy of determination of vertical displacements. Archival images of the European SENTINEL1 satellite, probing at a wavelength of $L = 23.5$ cm, were used to study vertical displacements of the earth's surface of the territory of the Chardara hydro complex on the basis of SAR interferometry. The radar data was processed using the SBAS (small baseline subsets) method. The obtained results are indicative of the relatively stable position of the hydro complex and the adjoining territory, with the presence of small areas of subsidence of the earth's surface with a speed of up to 10 mm / year within the projected regional network.

Key words: radar interferometry, hydraulic engineering structure.

УДК 621.396

**Ж.Ш. Жантаев, Д.Т. Шигаев, А.А. Калдыбаев,
С.М. Нурақынов, Н.Г. Бреусов, Г.Б. Мамырбек, С.Н. Мукашева**

Институт ионосферы Национальный центр космических исследований технологий,
Казахстан, г. Алматы

МОНИТОРИНГ ТЕРРИТОРИИ ШАРДАРИНСКОГО ГИДРОКОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Аннотация. В настоящей работе приведены результаты применения технологии радарной спутниковой интерферометрии для мониторинга и оценки вертикальных смещений территории Шардаринского гидрокомплекса. Изучаемый гидрокомплекс расположен на юге Казахстана вблизи г. Шардара [41°15'17"N; 67°58'09"E]. Спутниковая технология радиолокации с синтезированной апертурой, РСА, (Satellite Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR, techniques) в последние годы становится мощным инструментом для исследования деформации грунта и является эффективным инструментом для оценки эксплуатационной надежности и безопасности гидрокомплексов. Основным результатом дифференциальной интерферомет-

рической обработки являются картограммы смещений. Интерферометрическая обработка большой серии (15-20) радиолокационных снимков (Persistent Scatterers) позволяет достигать субмиллиметровой точности определения вертикальных смещений. Для исследования вертикальных смещений земной поверхности территории Шардаринского гидрокомплекса на основе PCA интерферометрии использовались архивные изображения европейского спутника SENTINEL1, зондирующего на длине волны $L=23,5$ см. Обработка радарных данных проводилась методом многопроходной интерферометрии SBAS (small baselines subsets). Полученные результаты свидетельствуют об относительно стабильном положении гидрокомплекса и прилегающей территории, с наличием небольших участков просадок земной поверхности со скоростью до 10 мм/год в пределах проектируемой региональной сети.

Ключевые слова: радарная интерферометрия, гидротехническое сооружение.

1. Введение

Современные техногенные нагрузки на тело плотины и процессы взаимодействия с вмещающими породами на протяжении длительного (десятки лет) отрезка времени эксплуатации могут привести к заметному изменению свойств и состояния пород в основаниях сооружений, непредсказуемому ухудшению напряженно-деформированного состояния плотины и, как следствие, снижению ее эксплуатационной надежности и безопасности. Особую актуальность эксплуатационные риски приобретают при размещении гидротехнического сооружения (ГТС) в непосредственной близости к активным тектоническим разломам и заметным усилением в связи с этим геодинамического влияния на безопасность эксплуатации гидрокомплекса. Спутниковая технология радиолокации с синтезированной апертурой, PCA, (Satellite Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR, techniques) в последние годы становится мощным инструментом для исследования деформаций грунта и является эффективным инструментом для оценки эксплуатационной надежности и безопасности гидрокомплексов.

В работах [1-11] показан потенциал применения усовершенствованных дифференциальных методов InSAR, в частности, таких как A-DInSAR (Advanced Differential InSAR techniques), для мониторинга состояния плотин и прилегающих территорий. Методы радарной интерферометрии применялись для структурного мониторинга состояния плотин the Three Gorges Dam (Китай) [1-5], the Plover Cove Dam (Гонконг) [1-3, 5-6] и the San Liberato Dam (Италия) [1]. С использованием технологии InSAR обнаружено поверхностное смещение на дамбах водохранилища La Pedrera (Испания) [4], исследовано состояние Чарвакской плотины (Узбекистан) [5], проведен мониторинг деформаций плотин Paradela, Raiva и Alto Ceira (Португалия) [7]. Спутниковые данные InSAR с высоким пространственным разрешением использовались для мониторинга состояния четырех плотин в Норвегии и Швеции [8-9], двух плотин the Genzano di Lucania и Corbara в Италии [10]. Особый случай, демонстрирующий важность наблюдений с помощью дистанционного зондирования, это мониторинг состояния крупнейшей иракской плотины в Мосуле, состояние которой представляет реальную угрозу для населения, где контролю безопасной эксплуатации препятствуют политические разногласия [11].

В работах [12-13] приведены результаты дифференциальной радиолокационной интерферометрии с синтезированной апертурой (D-InSAR) и персистентной рассеивающей интерферометрии (PS-InSAR), двух усовершенствованных методов интерферометрии SAR для обнаружения, анализа и мониторинга медленно движущихся оползней в районах со сложной топографией, с крутым рельефом и уязвимыми геологическими условиями на Тибетском плато [12] и вдоль южного берега реки Yangtze (Китай) [13]. Технология InSAR использовалась для контроля уровня воды в бассейнах рек Амазонка и Конго [14]. В работе [15] показано, что возможна автоматическая многоцелевая калибровка крупномасштабной одномерной гидродинамической модели всей дельты реки the Mekong Delta (Вьетнам) вниз по течению от реки Kratie в Камбодже с помощью спутниковых изображений с расширенной синтетической апертурой (ASAR) ENVISAT.

При дистанционном зондировании используются как текущие снимки SAR с высоким разрешением, так и предыдущие изображения с низким разрешением, в зависимости от конкретных целей каждого конкретного исследования. Изображения SAR, полученные на двух разных орбитальных геометриях: при прохождении спутника с севера на юг (нисходящая геометрия) и с юга на север (восходящая геометрия), позволяют одну и ту же область наблюдать под двумя углами зрения, почти симметричными. Стабильность состояния дамбы явно является

ключевым и чрезвычайно чувствительным фактором для региона. Усовершенствованные дифференциальные методы РСА интерферометрии позволяют исследовать области трудно-доступные для традиционных методов мониторинга, а также отслеживать по архивным данным историю развития тех или иных ситуаций [1-15].

Целью настоящего исследования является применение метода радарной спутниковой интерферометрии для мониторинга и оценки вертикальных смещений территории Шардаринского гидрокомплекса.

2. Методы исследования

Метод спутниковой радиолокационной интерферометрии использует эффект интерференции электромагнитных волн и основан на математической обработке нескольких когерентных амплитудно-фазовых измерений одного и того же участка поверхности плотины со сдвигом в пространстве приемной антенны РСА [16-20].

Технология спутниковой радиоинтерферометрии обеспечивает измерение вертикального и горизонтального смещения земной поверхности с точностью до нескольких миллиметров с расстояния сотни километров из космического пространства. Этот метод с 1992 г. реализуется Европейским космическим агентством (ЕКА) и является аналогом стереосъемки и основан на обработке двух радиолокационных снимков, получаемых спутниками на относительно малой базе (расстояние между сенсорами) около 300 м [16].

Дифференциальная интерферометрия использует два изображения (иногда три) того же самого исследуемого участка. Поскольку можно измерять только смещения вдоль спутниковой линии обзора (LOS, Line of Sight), комбинации данных, полученных с разных точек зрения, позволяют улучшить информацию об ориентации смещения.

В настоящее время создано множество программных пакетов (GAMMA, Photomod Radar, InSAR ERDAS Imagine, SARscape, RAT, DORIS, PolSARpro, ROI PAC), реализующих интерферометрическую обработку радиолокационных космоснимков. Пакеты в открытых кодах также содержат описание математических методов, на которых основываются отдельные этапы интерферометрической обработки. Происходит постоянное развитие метода радарной интерферометрии на основе интеграции опыта обработки данных и создания новых приложений, возникающих в связи с совершенствованием приборов спутникового дистанционного зондирования.

Основным результатом дифференциальной интерферометрической обработки являются картограммы смещений. Интерферометрическая обработка большой серии (15-20) радиолокационных снимков (Persistent Scatterers) позволяет достигать субмиллиметровой точности определения вертикальных смещений. Радиолокационная съемка аппаратами с синтезированной апертурой обладает рядом существенных преимуществ по сравнению со съемками в видимом и инфракрасном диапазонах: всепогодностью, круглосуточным режимом, стереоскопичностью и, главное, позволяет фиксировать вертикальные и горизонтальные движения поверхности с необходимой периодичностью и максимальной точностью – до миллиметров [1, 16]. Этот вид съемки обладает проникающей способностью до десятков метров, что позволяет изучать состояние структуры плотины. Интерферометрическая РСА – это альтернатива традиционной стереофотографической технике, которая может применяться для определения перемещений поверхности плотин вне зависимости от погодных условий и времени суток при съемке.

3. Результаты исследования

Объектом исследования является территория гидрокомплекса, расположенного вблизи города Шардара [41°15'17"N; 67°58'09"E] на юге Казахстана. Плотина гидроэлектростанции (ГЭС) на реке Сырдарья образует крупное Шардаринское водохранилище преимущественно ирригационного и противопаводкового назначения. Длина водохранилища по периметру – 80 км, ширина по периметру – 25 км, площадь – 783 км², полный объем – 5,7 км³, полезный объем – 4,2 км³, длина плотины по бьефу – 5 км, ширина плотины от подошвы – 35 м. Первый пробный запуск был произведен в 1965г., в 2008г. была произведена частичная модернизация. Космический снимок Шардаринского гидрокомплекса приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Космический снимок Шардаринского гидрокомплекса

Исследование вертикальных смещений земной поверхности территории Шардаринского гидрокомплекса на основе данных РСА интерферометрии. При выборе исходных данных для территории Шардаринского водохранилища, в первую очередь, учитывался временной диапазон и достаточно равномерные промежутки времени между снимками. Подходящие данные, по выбранным критериям, были найдены в архиве европейского спутника SENTINEL1 (<https://scihub.copernicus.eu/>), длина зондирующей волны спутника $L=23,5$ см. Исходный архив из 14 снимков спутника SENTINEL1 представлен на рисунке 2, где показана область покрытия снимками и даты снимков. Как видно из рисунка 2, временное покрытие распределено недостаточно равномерно (количество снимков за год сильно варьируется), количество зимних снимков составляет почти 50% от общего объема.

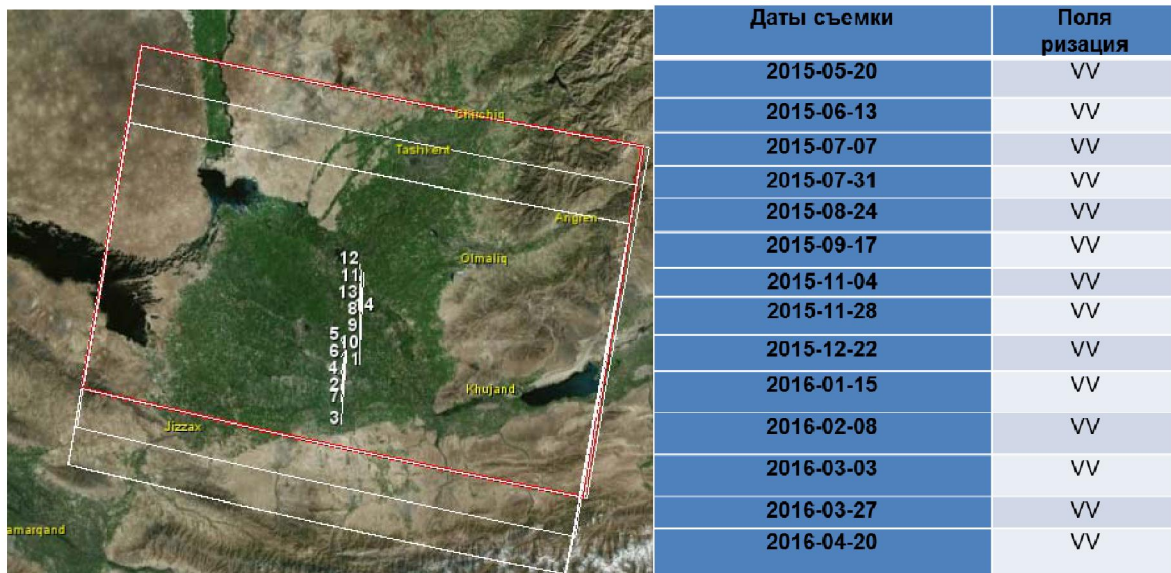


Рисунок 2 – Схема покрытия изучаемого участка снимками со спутника SENTINEL1 и таблица с датами снимков для территории Шардаринского гидрокомплекса

Результаты обработки радарных данных методом многопроходной интерферометрии SBAS (small baselines subsets). При выборе программного обеспечения для обработки радарных снимков учитывалась полнофункциональность выбранной программы: наличие модуля фокусировки сырых

радарных голограмм, наличие модуля обработки многопроходных пар и его технические возможности. Под описанные параметры лучше всего подходит программный комплекс SARscape от швейцарских разработчиков компании SARmap, который работает в программной оболочке ENVI от другой компании разработчиков Exelis (США). Интерфейс программы адаптивный и дружелюбный – внедрена возможность многопоточной обработки данных, вся цепочка многопроходной интерферометрии разбита на отдельные этапы, что позволяет полностью контролировать параметры обработки.

Модуль многопроходной интерферометрии малых базовых линий SBAS при задании значений пространственной линии (расстояние между повторными орбитами) и временной базы (время между датами съемки снимков) строит комбинации связей между снимками, что позволяет на выходе получать не 19 пар (интерферограмм) в нашем случае, а 190 ($20 \times 19/2$). По заданным параметрам пространственной и временной линии были построены парные снимки, в дальнейшем обработка проводилась для выбранных интерферограмм. Обработка методом SBAS с использованием программного комплекса SARscape состоит из следующих этапов:

- 1) автоматическая корегистрация, расчет интерферограмм, синтез фазы рельефа, вычитание фазы рельефа из интерферограммы, фильтрация дифференциальной интерферограммы, расчет когерентности, развертка фазы;
- 2) набор точек с известными координатами и высотами для коррекции орбитальных параметров (GCP- groundcontrolpoints – наземные контрольные точки);
- 3) расчет скорректированных дифференциальных интерферограмм и развернутых фаз;
- 4) инверсия полученных перекрестных во времени развернутых фаз по методике SBAS с восстановлением последовательной во времени истории смещений;
- 5) геокодирование результатов и экспорт векторных и растровых данных.

Выходным файлом результатов обработки был геопривязанный растровый файл скорости смещений точек земной поверхности, где в информации каждого пикселя записаны значения вертикальных смещений поверхности (рисунок 3).

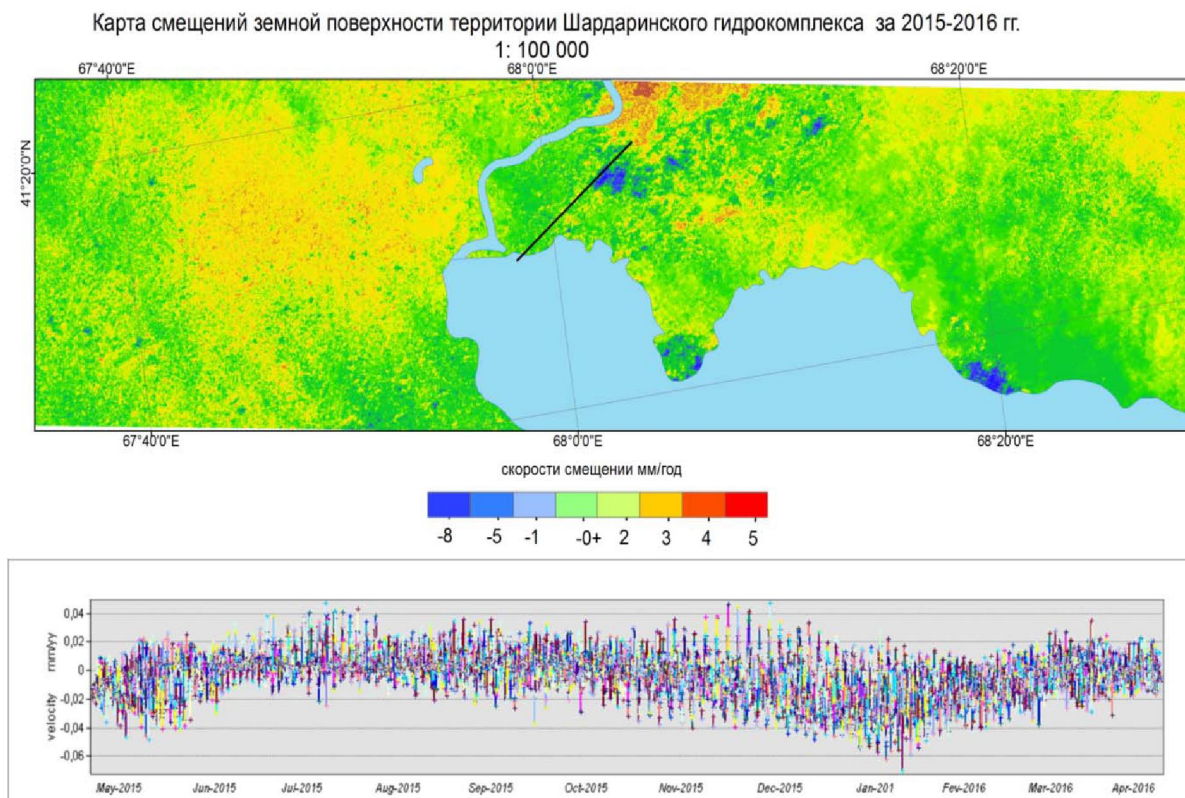


Рисунок 3 – Интерполированная карта скоростей вертикальных смещений точек земной поверхности территории Шардаринского гидрокомплекса, в мм/год

4. Обсуждение результатов

Результаты обработки методом SBAS, представленные на рисунке 3, показывают сильную зашумленность на территориях сельскохозяйственных полей, где когерентность сигнала падает ввиду постоянной изменчивости отражающей поверхности. Также негативное влияние оказал тот факт, что исходный архив снимков состоял на 50% из зимних снимков. Так как отражающая поверхность данной территории рано покрывается снегом (конец октября – начало ноября), а сход снежного покрова происходит в конце марта – начале апреля, то и сохранение стабильной когерентности такой поверхности маловероятна.

По проведенным исследованиям можно сделать следующие выводы: непосредственно территория Шардаринского гидрокомплекса стабильна и лишь немного подвержена процессам вертикальных деформаций точек земной поверхности. Для более достоверного анализа, с учетом условий отражающей поверхности, лучшим вариантом выбора съемочной системы будет PCA системы COSMO-SkyMed (Constellation of Small Satellites for The Mediterranean Basin Observation) [21] с пространственным разрешением 5 м и возможностью съемки до 4 снимков в месяц.

Выводы

Геодинамический мониторинг осуществляется с целью обеспечения постоянного контроля за состоянием безопасности гидротехнического сооружения, его воздействия на окружающую среду для предотвращения возникновения аварийных ситуаций и создания условий для безопасной эксплуатации. Представляет научный и практический интерес изучение деформационных процессов прилегающей территории и гидрокомплекса, находящегося в сейсмоопасной зоне на юге Казахстана вблизи города Шардара [41°15'17"N; 67°58'09"E], в непосредственной близости от государственной границы с Узбекистаном и его столицы, промышленного, финансового и туристического центра города Ташкента.

В настоящей работе показано использование данных дистанционного зондирования Земли, а именно, технологии радарной спутниковой интерферометрии для мониторинга и оценки вертикальных смещений территории Шардаринского гидрокомплекса.

Выполнен анализ снимков европейского спутника SENTINEL1 территории, включающей Шардаринский гидрокомплекс. Полученные результаты свидетельствуют об относительно стабильном положении гидрокомплекса и прилегающей территории, с наличием небольших участков просадок земной поверхности со скоростью до 10 мм/год в пределах проектируемой региональной сети.

Результаты исследований рекомендуется также использовать при построении геомеханических моделей деформационных процессов в земной коре территории, включающей Шардаринский гидрокомплекс.

Благодарности. Мы благодарны Европейскому космическому агентству за возможность доступа к снимкам спутника SENTINEL1 на сервере «The Copernicus Open Access Hub».

Работа выполнена в рамках НТП «Развитие космических технологий мониторинга процессов на земной поверхности и в литосфере, создание элементной базы и аппаратуры для его проведения, разработка приборов, аппаратно-программных средств и подсистем космической техники» (Шифр О.0673), подпрограмма «Развитие технологий наземно-космического геодинамического мониторинга территории Казахстана», тема «Разработать методологию выполнения комплексных мониторинговых наблюдений для предупреждений техногенных и геоэкологических катастроф на гидротехнических сооружениях с использованием спутниковых данных и методов математического моделирования», регистрационный номер (РН) 0115РК01278.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Mazzanti P., Perissin D., Rocca A. (2015) Structural Health Monitoring of Dams by Advanced Satellite SAR Interferometry: Investigation of Past Processes and Future Monitoring Perspectives. Proceedings of 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Torino, Italy. P.10. DOI: Monitoring_Dams_A-DInSAR.pdf

- [2] Wang T., Perissin D., Rocca F., Liao M. S. (2011) Three Gorges Dam Stability Monitoring With Time-Series InSAR Image Analysis. *Sci China Earth Sci.* 54(5), P. 720-732. DOI: 10.1007/s11430-010-4101-1
- [3] Tantiyanuparp P., Shi X., Zhang L., Balz T., Liao M. (2013) Characterization of Landslide Deformations in Three Gorges Area Using Multiple InSAR Data Stacks. *Remote Sens.* V. 5, P. 2704-2719. DOI: 10.3390/rs5062704
- [4] Tomas R., Cano M., García-Barba J., Vicente F., Herrera G., Lopez-Sanchez J. M., Mallorqui J. J. (2013) Monitoring An Earthfill Dam Using Differential Sar Interferometry: La Pedrera Dam, Alicante, Spain. *Engineering Geology.* V.157. P.21-32. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.01.022
- [5] Lazecky M., Perissin D., Zhiying W., Ling L., Yuxiao Q. (2015) Observing Dam's Movements with Spaceborne SAR Interferometry. *Engineering Geology for Society and Territory.* Springer International Publishing Switzerland. V. 5, P. 131-136. DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1_26.
- [6] Lazecky M., Perissin D., Scaioni M., Lei L., Qin Y. (2013) Plover Cove dam monitoring with spaceborne InSAR technique in Hong Kong. *Proceedings of 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Nottingham UK.* 4 pp.
- [7] Sousa J. J. M., Lazecky M., Hlavacova I., Bakon M., Patricio G., Perissin D. (2015) Satellite SAR Interferometry for Monitoring Dam Deformations in Portugal. *Proceedings of VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (VIII CNCG), Academia Militar - Aquartelamento da Amadora.* Available on: http://viiiicncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/VIIICNCG/cncg2015_comunicacao_13.pdf
- [8] Lier Ø., Cetinic F., Ekström I., Tom Rune Lauknes T.R., Larsen Y. (2015) InSAR on Embankment dams: Pilot on deformation measurement. *ENERGIFORSK, Swedish Energy Research Centre.* 34p. ISBN 978-91-7673-212-0.
- [9] Lier Ø. E., Ekström I., Larsen Y., Lauknes T. R. (2015) Verification of Remote Sensing in Dam Surveillance – Results of the Scandinavian InSAR pilot. *Proceedings of ICOLD 25 th Congress/ ICOLD 83rd Annual Meeting Symposium Hydropower'15.* Stavanger, Norway. 10 p.
- [10] Riccardi P., Tessari G., Lecci D., Floris M., Pasquali P. (2017) Use of Sentinel-1 SAR data to monitor Mosul dam vulnerability. *Proceedings of General Assembly the European Geosciences Union, EGU2017.* V. 19. P. EGU2017-13098.
- [11] Corsetti M., D'Aranno P.J.V., Giancola F., Marsella M., Scifoni S., Sonnessa A., Manunta M. (2016) Satellite Techniques: New Perspectives for the Monitoring of Dams. *Proceedings of The Joint International Symposium on Deformation Monitoring, The Vienna University of Technology, Vienna, Austria.* 6p.
- [12] Wang Z., Perissin D. (2012) Cosmo SkyMed AO projects – 3D reconstruction and stability monitoring of the Three Gorges dam. *Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2012.* Munich, Germany. P. 3831-3834. DOI:10.1109/IGARSS.2012.6350577
- [13] Perissin D., Wang Z., Prati C. Rocca F. Terrain Monitoring in China via PS-QPS INSAR: Tibet and The Three Gorges Dam. Available on: <https://pdfs.semanticscholar.org/02c4/26256cc1733b9eb7b4c22791d2b7d887f19a.pdf>
- [14] Jung H. C., Hamski J., Durand M., Alsdorf D., Hossain F., Lee H., Azad Hossain A. K. M., Hasan K., Khan Abu S. Zeaul Hoque A.K.M. (2010) Characterization of complex fluvial systems using remote sensing of spatial and temporal water level variations in the Amazon, Congo, and Brahmaputra Rivers. *Earth Surf. Process. Landforms*, Published online in Wiley InterScience: www.interscience.wiley.com. DOI: 10.1002/esp.1914
- [15] Dung N. V., Merz B., Bardossy A., Thang T. D., Apel H. (2011) Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, V.15, P. 1339-1354. DOI:10.5194/hess-15-1339-2011
- [16] Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, V. 39. No 1. P. 8-20.
- [17] Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca (2000) Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, V. 38. P. 2202-2212.
- [18] Pritchard M.E. (2006) InSar, a tool for measuring Earth's surface deformation // *Physics Today.* American Institute of Physics. P. 68-69. S-0031-9228-0607-370-4
- [19] Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Mammone C., Minati F., Paglia L., Trillo F., Vecchioli F. (2015) Persistent scatterer pair (PSP) Interferometry and Surface Reconstruction Techniques for Urban DSM from High Resolution Satellite SAR Acquisitions. *Proceedings of Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop.* The European Space Agency, Frascati, Italy (Rome). 5 p.
- [20] Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. (2004) A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters.* V. 31, L23611. doi:10.1029/2004GL021737
- [21] Herbert J.K. (2002) *Observation of the Earth and Environment.* Springer, Germany. ISBN: 3-540-42388-5

**Ж.Ш. Жантаев, Д.Т. Шығайев, А.А. Қалдыбаев,
С.М. Нұрақынов, Н.Г. Бреусов, Ғ.Б. Мамырбек, С.Н. Мұқашева**

Ионосфера институты, Алматы, 050020, Қазақстан

ШАРДАРА СУ КЕШЕНІНІҢ АУМАҒЫН ЖЕР СЕРІКТІК РАДИОЛОКАЦИЯЛЫҚ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЕРЕКТЕРІ НЕГІЗІНДЕ БАҚЫЛАУ

Андатпа. Бұл жұмыста Шардара су кешенінің аумағын бақылау және вертикальды жылжуын бағалау үшін жер серіктік радиолокациялық интерферометрияны қолдану нәтижелері келтірілген. Қарастырылып отырған су кешені Қазақстанның оңтүстігіндегі Шардара қаласы жанында орналасқан [41°15'17"N; 67°58'09"E]. Синтезделген апертурамен РСА, (Satellite Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR, techniques) жер серіктік радиолокация технологиясы кейінгі жылдары су кешендерінің жер деформациясын зерттеуде күшті құрал ретінде қалыптасуда және пайдалану беріктігін және қауіпсіздігін бағалайтын тиімді құрал болып табылады. Дифференциалды интерферометрикалық өңдеу нәтижесі болып жылжу картограммалары болып табылады. Радиолокациялық кескіндердің (Persistent Scatterers) үлкен серияларын (15-20) интерферометриялық өңдеу вертикальды жылжуларды анықтауда субмиллиметрлік дәлдігіне қол жеткізеді. РСА интерферометрия негізінде Шардара су кешенінің аумағының жер бетінің вертикальды жылжуын зерттеуде $L=23,5$ см. ұзындықтағы толқынында зондтайтын SENTINEL1 еуропалық жер серігі мұрағаттық кескіндер пайдаланылды. Радарлы деректер SBAS (small baselines subsets) көп өтпелі интерферометрия әдісімен өңделді.

Алынған нәтижелер су кешені мен оның аумағының тұрақты жағдайда екенін және жобаланылып отырған жергілікті торап шекарасында шағын жер телімдерінің жылдамдығы 10 мм/жыл жер бетінің шөгугі орын алғанын айғақтайды.

Тірек сөздер: радарлы интерферометрия, гидротехникалық құрылыстар.

Сведения об авторах:

Жантаев Жумабек Шабденамович - д-р физ.-мат. наук, директор ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Садоводческое товарищество «Ионосфера», дом 117, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», admion1@mail.ru;

Шығайев Даурен Талғатович - PhD-докторант, начальник отдела НКГТМ ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Садоводческое товарищество «Ионосфера», дом 117, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», dashigaev@gmail.com;

Қалдыбаев Азамат Алмасханович - PhD-доктор, заведующий лабораторией НКГТМ ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Садоводческое товарищество «Ионосфера», дом 117, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», azamat.kaldybaev@gmail.com;

Нұрақынов Серик Маратович - PhD-докторант, заведующий сектором отдела НКГТМ ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Садоводческое товарищество «Ионосфера», дом 117, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», ser87n@mail.ru;

Бреусов Николай Георгиевич - канд.геол.-мин. наук, главный научный сотрудник отдела НКГТМ ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Садоводческое товарищество «Ионосфера», дом 117, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», breusov47@mail.ru;

Мамырбек Габит Байжумаулы - заведующий сектором отдела НКГТМ ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Садоводческое товарищество «Ионосфера», дом 117, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», gmb_79@mail.ru;

Мұқашева Сауле Нурмуханбетовна - ведущий научный сотрудник отдела НКГТМ ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Садоводческое товарищество «Ионосфера», дом 117, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», gmb_79@mail.ru