Лито-структурное картирование селеопасных зон западного Дарваза (Таджикистан и Афганистан) по данным Sentinel и с использованием методов дистанционного зондирования

Дж.Х. Аминов[1,2], А.Р. Фазылов[1], Дж.Х. Аминов[3,4], Ю. Мамаджанов[5], М.З. Кобулиев[2], Дж.Б. Ниязов[1]

[1]*Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, javhar1985@gmail.com*

[2]*Синьцзянский институт экологии и географии Китайской академии наук, Урумчи, Китай, kobuliev@list.ru*

[3]*Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, jovid.aminov@outlook.com*

[4]*Институт исследования Тибетского плато Китайской академии наук, Пекин, Китай*

[5]*Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Душанбе, Таджикистан, petrology@mail.ru*

Аннотация. Для исследования оползней, являющимися одним из факторов формирования селевых потоков в условиях экстремальных, критических пороговых значений количества жидких осадков, а также анализа устойчивости склонов, носителем ключевой информации являются геологические карты. Существенное значение для осмысления подобных рисков стихийных бедствий имеет литологическая и структурная информация, содержащая сведения о типе породы и геоморфологических условиях. Исследуемая территория - район Дарваз является одной из уязвимых зон, подвергающейся рискам стихийных бедствий и, в том числе частым селепроявлением. В частности, 9 июля 2017 года сель, сошедший с гор левобережного афганского Дарваза и спровоцировавший оползень, перекрывший русло реки Пяндж, привел к человеческим жертвам на афганской территории и к разрушению жилых объектов на территории Таджикистана. Данное исследование для литологического и структурного картирования с помощью методов улучшения изображения осуществлено с применением набора спутниковых снимков Sentinel, включая радары с синтезированной апертурой (SAR)-S1A и оптический S2A. При этом распознавание и разграничение литологических единиц на оптических изображениях в исследуемой области достигнуто путём определения наиболее подходящей цветовой композиции и независимых компонентов из анализа независимых компонентов (ICA). Анализ линеаментов на радарных снимках для структурного картирования в исследуемой области осуществлён посредством соотношения компонентов и определением оптимальных параметров для автоматического их выявления с помощью комбинации алгоритмов обнаружения контуров и связывания линий. Отражены результаты сравнения полученных изображений с существующими геологическими картами и затенённым рельефом района исследования – Дарваза.

Ключевые слова: *Дарваз, сель, оползень, дистанционное зондирование, Sentinel 1A, Sentinel 2A, улучшение изображения, геологическое картирование, цветные композиты*

Ссылка для цитирования: Аминов Дж.Х., Фазылов А.Р., Аминов Дж.Х., Мамаджанов Ю., Кобулиев М.З., Ниязов Дж.Б. Лито-структурное картирование селеопасных зон западного Дарваза (Таджикистан и Афганистан) по данным Sentinel и с использованием методов дистанционного зондирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 134–145.

Litho-structural mapping of debris flow hazard zones of Western Darvaz (Tajikistan and Afghanistan) from Sentinel data using remote sensing techniques

J.H. Aminov[1,2], A.R. Fazilov[1], J.H. Aminov[3,4], Y. Mamadjanov[5], M.Z. Kobuliev[2], J.B. Niyazov[1]

[1]*Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, javhar1985@gmail.com*

[2]*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, China, kobuliev@list.ru*

[3]*Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, jovid.aminov@outlook.com*

[4]*Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

[5]*Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), Dushanbe, Tajikistan, petrology@mail.ru*

Abstract. The landslides are one of the factors, which trigger formation of debris flows under extreme, critical threshold values of the amount of liquid precipitation. For investigation of landslides, as well as analysis of the stability of the slopes, the key sources of information are geological maps. The lithological and structural information has significant value for understanding these disaster risks containing the information about the type of rock and geomorphological conditions. The study area - Darvaz region is one of the vulnerable areas at risk of natural disasters and, in particular, frequent debris flows. In particular, on July 9, 2017, the debris flow that came down from the mountains of the left-bank of the Panj River - Afghan Darvaz and instigated a landslide, thus blocking the channel of the Panj River and leading to human casualties on Afghan territory and to the destruction of residential facilities on the territory of Tajikistan. The study for lithological and structural mapping through image enhancement techniques is carried out using the Sentinel satellite dataset, including Synthetic Aperture Radar (SAR) -S1A and optical S2A. Wherein, the recognition and discrimination of lithological units from optical images in the study area achieved by determining the most suitable color composition and independent components from the independent component analysis (ICA). The analysis of lineaments on radar images for structural mapping in the study area are implemented through the component ratioing and determination of the optimal parameters for automatic extraction of lineaments with a combination of edge detection and line-linking algorithms. The obtained results are compared with the existing geological and shaded relief thematic maps of the study area.

Key words: *Darvaz, debris flow, landslide, remote sensing, Sentinel 1A, Sentinel 2A, image enhancement, geological mapping, color composites*

Cite this article: Aminov J.H., Fazilov A.R., Aminov J.H., Mamadjanov Y., Kobuliev M.Z., Niyazov J.B. Litho-structural mapping of debris flow hazard zones of Western Darvaz (Tajikistan and Afghanistan) from Sentinel data using remote sensing techniques. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 134–145.

Введение

Дистанционное зондирование и его результаты чрезвычайно востребованы для проведения геологических исследований.

Геологические карты являются носителем ключевой информации для исследования оползней, являющимися одним из факторов формирования селевых

потоков в условиях экстремальных и критических пороговых значений количества жидких осадков, а также анализа устойчивости склонов.

Наиболее распространённым методом составления геологических карт было использование данных, полученных наземными исследованиями при организации полевых наблюдений.

В горных районах, где многие местности труднодоступны, качество и точность традиционного картирования недостаточно высокие. В настоящее время, разработанные методы дистанционного зондирования открыли новую эру в литологическом картировании. Дистанционное зондирование и ГИС-методы могут быть интегрированы для распознавания типов горных пород и линеаментов. Наряду с этим для картирования зон минерализации и исследования почвенного слоя весьма эффективно используются методы спектрального и пространственного улучшения снимков и их цифровая обработка, включая преобразованное пространство признаков данных - анализ независимых компонентов (ICA) и анализ главных компонентов (PCA), соотношение полос, цветовые композиции (натуральные или искусственные), растяжение декорреляции и спектральный индекс [*eg. Ali et al., 2013; Asadzadeh et al., 2016*].

Картирование линейных структурных сегментов, которые называются «линеаментами» на поверхности Земли, всегда было важной частью любого структурно-геологического исследования. Линеаменты раскрывают архитектуру подстилающих пород, образовавшихся в результате различных тектонических (деформационных) процессов на протяжении всей геологической истории региона [*Ramli et al., 2010*]. Ввиду того, что традиционные методы наземного картирования сложны и трудоемки, их эффективность для структурно-геологических исследований многих горных районов, в том числе для данного района исследований, низкая. Таким образом, возникла необходимость в разработке автоматических, менее трудоемких подходов для геологического картирования подобных регионов, используя при этом спутниковые снимки, а также вычислительное программное обеспечение и алгоритмы.

Линеаменты обычно встречаются в виде границ с тональными различиями на спутниковых изображениях и большинство подходов обнаружения основаны на методах улучшение краев и фильтрации [*eg. Pour et al., 2014; Fagbohun et al., 2017*].

В существующих исследованиях были предложены два основных метода идентификации линейных элементов и извлечения их из данных дистанционного зондирования.

Первый метод подразумевает улучшение и визуальную интерпретацию линейных структурных сегментов с использованием методов улучшения снимков, а именно: соотношение спектральных полос снимков, слияние изображений, фильтры направленного движения и обнаружение краёв, позволяют создать линейную векторную карту с использованием методов ручной оцифровки [*Eldosouky et al., 2017*]. Несмотря на эффективность, этот метод довольно трудоемкий и требует от пользователя оцифровки линеаментов вручную.

С другой стороны, вторая методика позволяет обнаруживать и автоматически выявлять линейные сегменты с использованием компьютерного программного обеспечения и алгоритмов, в конечном итоге создавая карту линеаментов [*eg. Kim et al., 2004*]. Автоматический подход выявления линейных объектов включает в себя как ручную визуализацию, так и автоматическое извлечение линейных элементов с использованием такого программного обеспечения, как PCI GeoAnalyst, Geomatica и алгоритм Canny [*Marghany et al., 2010*] и Matlab [*Rahnama et al., 2014*]. Наиболее широко используемым программным обеспечением для автоматического извлечения линеаментов является модуль LINE в составе PCI Geomatica [*Hung et al., 2005b*].

Ручные и автоматизированные методы извлечения линеаментов могут дать надежные результаты. Ручной метод широко используется для валидации линеаментов, извлеченных автоматизированным методом [*eg. Aminov et al., 2019*]. Однако ручная интерпретация улучшенных изображений для извлечения структурной информации может быть сложной задачей, которая требует много времени и сильно зависит от качества анализа и опыта экспертов [*Masoud et al, 2006*]. Следовательно, автоматические

методы извлечения линеаментов стали более полезными в последние несколько десятилетий.

В настоящее время развитие и прогресс в геоинформационных системах (ГИС) и методов дистанционного зондирования позволяют использовать различные источники данных и методы для характеристики линеаментов.

Спутники Sentinel являются частью космической программы Copernicus, действующей в Европейском космическом агентстве (ESA). Программа направлена на то, чтобы заменить прошлые миссии по дистанционному зондированию и обеспечить непрерывность данных для исследования атмосферы, а также мониторинга океана и суши. Для этого используются шесть различных спутниковых миссий, сосредоточенных на разных аспектах наблюдения Земли. Среди этих шести миссий Sentinel-1 (S1) и Sentinel-2 (S2) предоставляют обычные снимки дистанционного зондирования, полученные SAR и оптическими датчиками, соответственно [*Berger et al., 2012*].

Памир и его окрестности – это один из горных регионов, труднодоступных для наземных исследований. Этот район является западным продолжением тибетско-гималайского региона и остается геологически наименее изученной территорией. Отчасти это связано со сложным рельефом и климатом данного региона, которые затрудняют доступ во время наземных съемок. Следует отметить, что геологические карты, составленные в ходе наземных изысканий в 20-м веке, являются предметом споров и требуют пересмотра.

Основной целью данного исследования является применение методов дистанционного зондирования в литологическом и структурном картографировании в зонах с опасным и катастрофическим схождением селевых потоков (рис. 1).

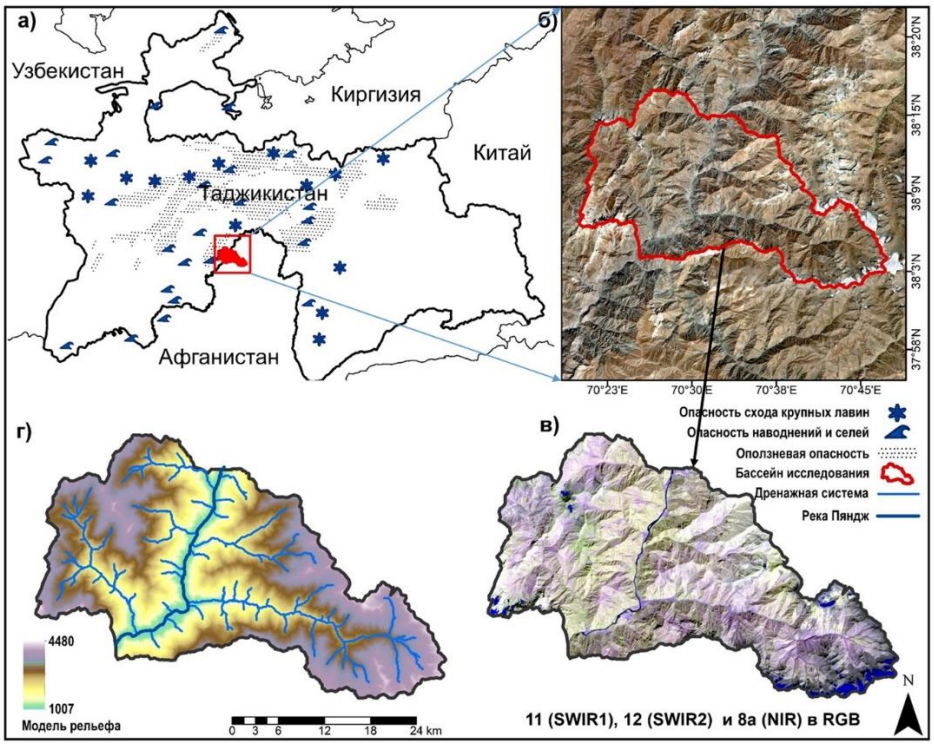

Рис. 1. Карта расположения исследуемой территории и проявления стихийных бедствий в Таджикистане [источник: *КООСПРТ*] (а). Изображение натуральной цветовой композиции исследуемой области (б). Изображение ложной цветовой композиции (в). Карта модели рельефа и дренажной системы (г)

Fig. 2. The location map of the study area and the manifestation of natural disasters in Tajikistan [source: *CEPGRT*] (a). The true color composite image of the study area (б). False color composite Image (в). Drainage and elevation model map (г)

Реализация поставленной цели осуществлена с использованием данных Sentinel-1A и Sentinel-2A, доступных современных методов и программного обеспечения для пространственного и спектрального анализа. Такой комплексный подход исследований позволяет реализовать картирование разнообразных типов горных пород, при этом различая их друг от друга, а также очерчивая линейные особенности в данной области исследования с использованием данных дистанционного зондирования.

Геологическое строение района исследования

Район исследования расположен на границе Афганистана с Таджикистаном, относительно русла трансграничной реки Пяндж и охватывает бассейны четырёх её притоков, которые впадают в неё с обеих сторон (рис. 1).

Административно этот участок входит в состав Дарвазского района Таджикистана и Шикаиского района Афганистана. В геологическом отношении исследуемый бассейн притоков реки Пяндж входит в состав северо-памирской тектонической зоны и с востока примыкает к Дарвазскому сдвигу, который является юго-западным продолжением основного памирского надвига. Находясь в зоне глубинного разлома, рассматриваемый участок характеризуется интенсивной деформацией горных пород, выражающаяся в их складчатости и нарушением многочисленными разломами (рис. 2б). Стратиграфически район исследования состоит из отложений нижнего и верхнего палеозоя (ордовик — пермь), которые прорываются нижне - карбоновыми гранитоидами и верхнепермьскими габбродиоритами и диоритами. Ордовикские отложения представлены морскими терригенными отложениями (глинистые сланцы, песчаники). Разрез нижне-карбоновых отложений состоит в основном из эффузивных и туфогенных образований, однако в нижней части разреза основные эффузивы перекрываются морскими терригенно-карбонатными отложениями (известняки, глинистые сланцы, песчаники). Верхне-каброновые отложения в основном состоят из терригенно-карбонатных отложений (известняки, сланцы, песчаники, конгломераты). Нижняя пермь представлена переслаиванием известняков с песчаниками и конгломератами. Стратиграфический разрез завершается небольшим обнажением палеогеновых песчаников, алевролитов и конгломератов (рис. 2б).

Описание данных

Набор спутниковых данных, охватывающий район исследования, включает в себя снимки Sentinel-1A (S1A) и Sentinel-2A (S2A). В данном исследовании было использовано изображение S2A с T42SXH номером, снятым 09 сентября 2018 года, обладающее всеми пространственными и спектральными характеристиками, соответствующими продукту уровня 1C (L1C) S2A мультиспектральный инструмент. Спектральные каналы включают в себя четыре полосы с пространственным разрешением 10 м (2, 3, 4 и 8a), шесть полос с разрешением 20 м (5, 6, 7, 8b, 11 и 12) и три полосы по 60 м (1, 9 и 10). В исследовании также использовалось радарное изображение с синтезированной апертурой (SAR) S1A, полученное с помощью интерферометрического режима широкого диапазона (IW) на восходящей орбите и двойной поляризации (вертикальная передача, вертикальный приём VV и вертикальная передача, горизонтальный прием VH) 16 августа 2019 года. Использованный S2A MSI в качестве продукта L1C и изображения S1A SAR C-диапазона (5,405 ГГц) были получены бесплатно с веб-сайта Copernicus - центр открытого доступа [*ESA*]. Кроме того, для орторектификации радарного изображения и анализа затенённого рельефа использовалась SRTM модель рельефа.

Предварительная обработка и улучшение изображений

Этап предварительной обработки изображений является важным для уменьшения атмосферного эффекта, существующего на оптических изображениях дистанционного

зондирования [*Tempfli et al., 2009*]. Данная обработка была выполнена для мультиспектральных данных S2A, с целью улучшения качества необработанных изображений, используемых в этом исследовании. Радарное изображение также было предварительно обработано фильтрацией и коррекцией местности (орторектификация), с целью уменьшения существующего шума и геометрического исправления изображения.

Полученный набор данных S2A L1C был атмосферно скорректирован с использованием процессора Sen2Cor версии 2.5.5 [*European Space Agency, 2017*]. Процессор Sen2Cor выполняет предварительную обработку продукта данных TOA L1C и применяет классификацию изображений с коррекцией атмосферы, рельефа местности и перистых облаков с последующим преобразованием в орто-изображения второго уровня (L2A), со значениями отражения от поверхности (reflectance) нижней части атмосферы (BOA). Полученный набор данных BOA охватывает полосы 2 - 7, 8, 8a, 11 и 12. Прибрежная аэрозоль - полоса 1 (60 м), водяные пары - полоса 9 (60 м) и перистые облака - полоса 10 (60 м) были исключены процессором атмосферной коррекции. Кроме того, набор данных изображения был пространственно изменён для уменьшения размера изображения, с целью охвата заданной области исследования.

Радарный снимок SAR S1A был также предварительно обработан с помощью модуля обработки Sentinel-1 программы SNAP версии 7.0.0 [*Sentinel-1 Toolbox*], разработанный ESA. На этом этапе в первую очередь была применена фильтрация подавления спекл-шума, что позволило сохранить структуру данных изображения путём фильтрации однородных поверхностей и сохранения краёв, что важно в исследованиях в области структурной геологии. Для этой цели был применён уточнённый фильтр Ли [*Lee, 1981*], который широко используется для уменьшения спекл-эффекта на изображениях SAR. Спекл-шумы на изображениях SAR генерируются когерентной интерференцией волн, обратно рассеянных от шероховатой поверхности Земли, что усложняет проблему интерпретации изображений [*Lee et al., 1999*].

Вместе с тем, для достижения изображения, геометрически представляющего реальную поверхность Земли, выполнена коррекция местности (геокодирование и орторектификация снимка), используя при этом метод Range-Doppler Terrain Correction.

Такой подход был реализован использованием цифровой модели рельефа (SRTM) с пространственным разрешением 3 угловых секунды (90 м), рекомендуемой для радарных данных.

В результате предварительной обработки данных были получены снимки, содержащие два слоя: амплитуды (A) и интенсивности (I) в поляризациях VV и VH соответственно. Компоненты (A и I) содержат информацию об амплитуде и фазе обнаруженного сигнала и хранятся в разных слоях. Слой (A) обозначает положение момента времени в цикле формы волны переданного микроволнового сигнала датчиком, тогда как слой (I) обозначает измеренную интенсивность обратного рассеяния сигнала датчиком. Объединение компонентов (A и I) осуществлено с использованием так называемой методики определения соотношения.

Методика исследования

Обработка изображений, реализованная в этом исследовании, включает в себя построение изображения с использованием ложной цветовой композиции (FCC), анализа независимых компонентов (ICA) и автоматического выявления линеаментов. На FCC изображениях, полосы 8, 8a, 11 и 12 оказались более информативными для литологического разграничения, чем полосы 2, 3, 4, 5, 6 и 7 набора данных S2A. ICA является методом извлечения признаков, целью которого является поиск набора некоррелированных компонентов, максимально независимых друг от друга [*Jutten et al., 1991; Yang et al., 2014a*]. Каждая компонента содержит спектральную информацию, соответствующую определенному признаку в исходном изображении.

Установлено, что метод ICA, по сравнению с PCA, оказался более применимым для характеристики, а также для классификации литологических единиц [*Yang et al., 2014b*].

Автоматическое выявление линеаментов осуществляется в двух этапах обработки. Первым этапом является обнаружение краёв, дающих информацию об областях резких изменений значений соседних пикселей, тогда как второй этап позволяет обнаружить линии [*Adiri et al., 2017*]. Реализация двух этапов обработки осуществлена с использованием модуля LINE программы PCI Geomatica, используемого для автоматического извлечения линеаментов [*Abdullah et al., 2010; Qari, 2011*]. В этом модуле применяются методы фильтрации и свёртки изображения для увеличения резкости и выявления линейных структур, тогда как извлечение (картирование) выявленных линеаментов проводится путём прослеживания смежных пикселей похожей яркостной интенсивности. При этом, важным является определение оптимальных параметров для выявления и извлечения линеаментов. Параметры для данного исследования подбирались путём анализа спектральной характеристики использованного снимка и существующей литературы (таблица). Более подробно методика и алгоритм обработки радарных снимков для выявления и извлечения линеаментов описаны в работе [*Aminov et al., 2019*].

Подготовленное изображение S1A-VH исследуемой области использовалось в качестве входных данных модуля LINE для составления карты линеаментов (рис. 4а).

Таблица. Примененные значения параметров модуля LINE

Table. Applied values of LINE module parameters

Пороговые параметры и единицы		**Значения**		
		по умолчанию	**предложены**	**применены**
1	RADI (в пикселях)	10	3-8	8
2	GTHR (в диапазонах, 0-255)	100	10-70	60
3	LTHR (в пикселях)	30	10-50	20
4	FTHR (в пикселях)	3	2-5	3
5	ATHR (в градусах)	30	3-20	15
6	DTHR (в пикселях)	20	10-50	20

Предполагается иллюминация растровой поверхности, заданная с разным азимутом и высотой солнца. Границы между затенёнными и не затенёнными участками могут указывать на наличие линеаментов [*Masoud et al., 2006; Saadi et al., 2011*]. Поэтому, анализ карты затенения рельефа (shaded relief), извлеченной из цифровой модели рельефа (DEM), способствует выявлению линеаментов. Поэтому тематическая карта с затенённым рельефом была получена из модели рельефа и улучшена путём применения минимально-максимального растяжения вдоль цветовой шкалы. Азимут, который указывает на относительное положение Солнца вдоль горизонта, и высотный угол, указывающий на угол возвышения Солнца над горизонтом, были выбраны по умолчанию. Задача была выполнена с использованием инструмента «Hillshade» в программном обеспечении ArcMap.

Результаты

Методы предварительной обработки изображений - радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция для снимков Sentinel-2A (S2A) и спекл-фильтрация и коррекция местности для изображений Sentinel-1A (S1A), позволили предварительно улучшить и подготовить их для дальнейшего анализа.

В соответствии со спектральными характеристиками используемого изображения S2A, наилучший литологический контраст отображается цветовой композицией полос 11, 12 и 8 или 8a в RGB соответственно. Подобные спектральные каналы были определены как более информативные, используемые в геологических исследованиях для выделения литологических единиц посредством составного изображения в ложном цвете [*Aminov et al., 2018*]. Как показано на рис. 1в, представленная комбинация полос позволяет разграничить слои конгломератов и диоритовые тела по их ярким цветам; а туфогенные породы имеющие также яркий цвет, позволяют хорошо отличать их от известняковых пород.

Результаты независимых компонентов, полученные с помощью анализа независимых компонентов, и интерпретированная информация от этих компонентов, относящаяся к спектральным каналам, содержащим литологическую информацию (рис. 2а), показывают, что независимые компоненты IC1, IC4 и IC5 могут интерпретироваться как связанные с определенными литологическими единицами в пределах области исследования.

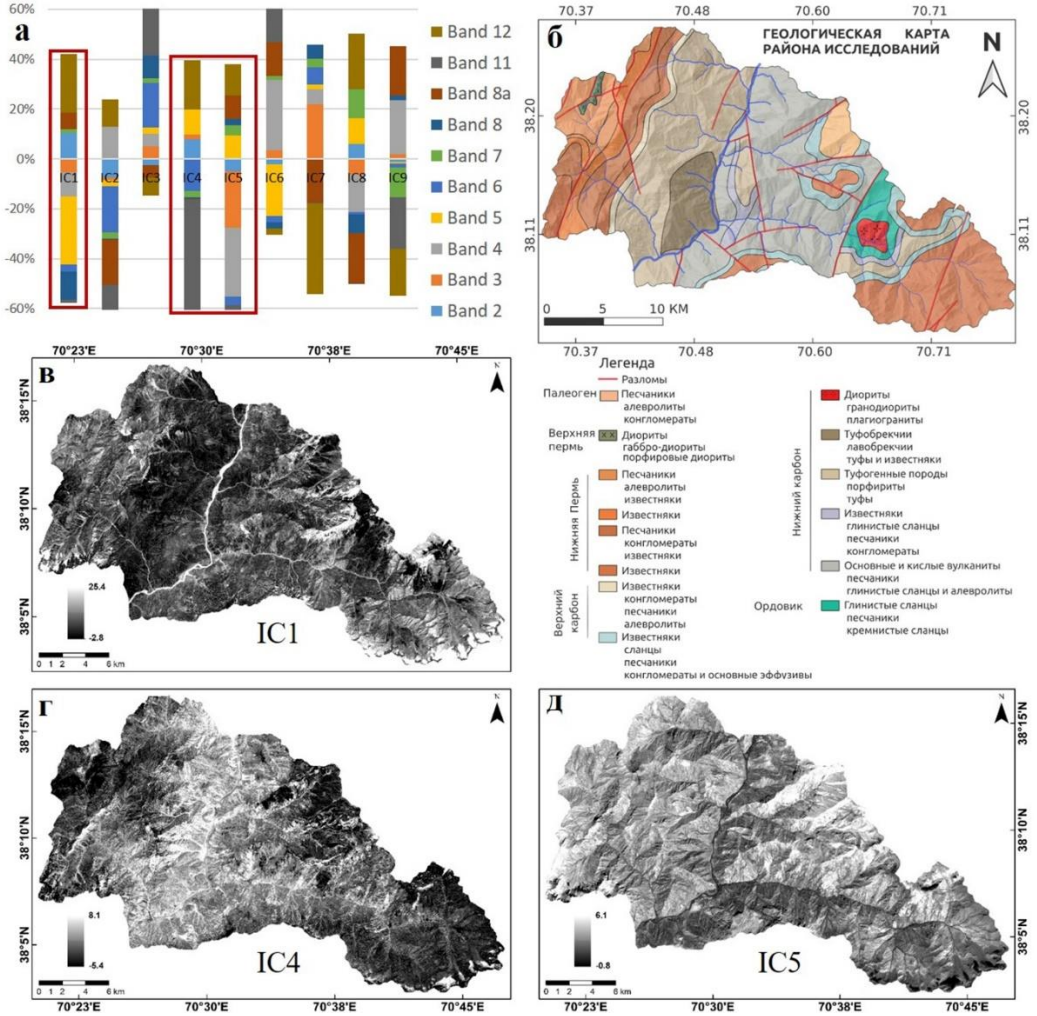

Рис. 3. Результаты, полученные с помощью метода ICA, применённого к предварительно обработанным данным: а) 100% составная диаграмма, показывающая значение элементов на независимых компонентах; б) Геологическая карта района исследования; в)–д) карты, показывающие значения на IC 1, 4, 5 соответственно

Fig. 4. The obtained results using the ICA method applied to preprocessed data: a) 100% stacked diagram showing the loadings of elements on independent components; b) Geological map of the study area; v) - d) maps showing values on IC 1, 4, 5, respectively

Например, некоторые из известняков отличаются на IC1 своими положительными значениями, тогда как туфогенные породы, основные и кислые вулканиты отличаются отрицательными значениями (рис. 2в). Аналогично, IC4 различает диоритовые, туфогенные породы, основные и кислые вулканиты по их положительным значениям, а песчаники и конгломераты по их отрицательным значениям (рис. 2г). Конгломераты лучше всего можно отличить от известняков, туфогенных пород, основных и кислых вулканических пород на IC5 по их соответственно положительным и отрицательным значениям (рис. 2д). FCC изображение из этих независимых компонентов было сделано путем назначения IC5 для красного цвета, IC4 для зеленого и IC1 для синего компонентов RGB (рис. 3). Это FCC изображение хорошо показывает отличия различных горных пород, поскольку оно содержит большую часть данных, отражающих литологические изменения. Это изображение оказалось значимым для различения пород, где каждый тип породы имеет свой определенный цвет.

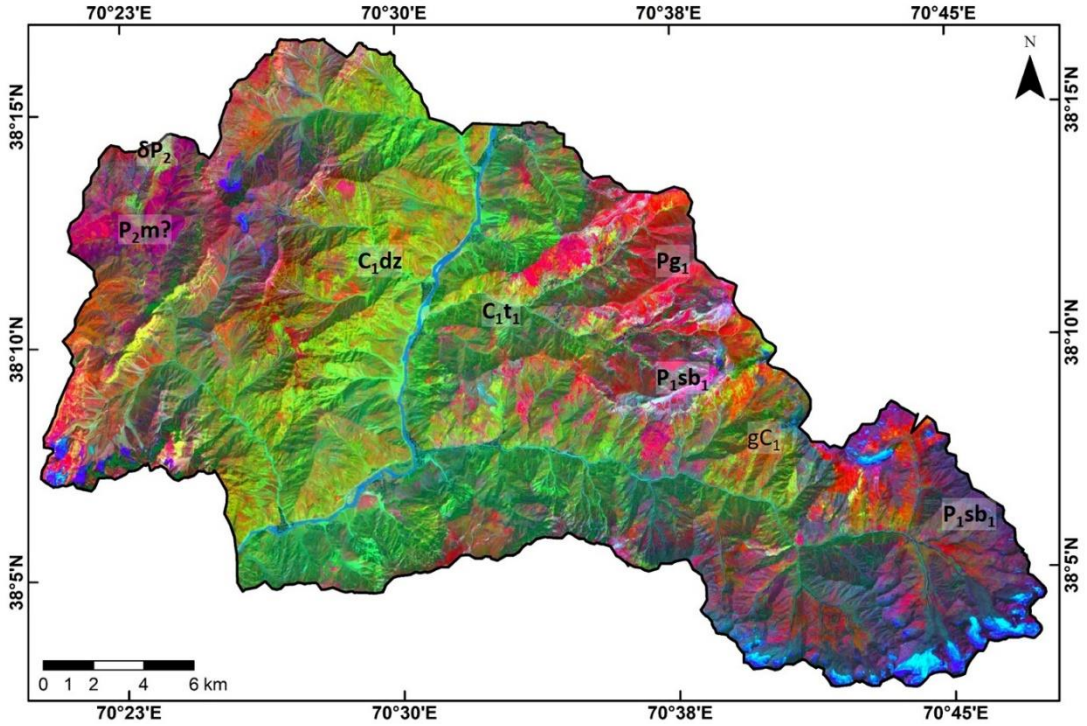

Рис. 5. Цветовая композиция, полученная от независимых компонентов из анализа IC на снимке Sentinel-2A (IC5, C4, IC1 в R, G, B) исследуемой области. C1t1 -Основные и кислые вулканиты, песчаники; P1sb1 –Известняки; P2m? -Песчаники, алевролиты, конгломераты; δP2 -Диориты, порфировые диориты; C1dz -Туфогенные породы, порфириты, туфы; Pg1 -Конгломераты, песчаники, алевролиты; gC1 -Диориты, гранодиориты, плагиограниты

Fig. 6. Color composite of independent components from the IC analysis on Sentinel-2A image (IC5, C4, IC1 в R, G, B) of the study area. C1t1 - Basic and felsic volcanics, sandstones; P1sb1 – Limestones; P2m? -Sandstones, siltstones, conglomerates; δP2 -Diorites, porphyry diorites; C1dz - Tuffaceous rocks, porphyrites, tuff; Pg1 - Conglomerates, sandstones, siltstones; gC1 -Diorites, granodiorites, plagiogranites

В процессе исследований проанализирована также корреляция между выделенными линеаментами и затенением освещения путём наложения автоматически извлеченных линеаментов (рис. 4б) на тематическую карту с затенённым рельефом. На основе полученных результатов анализа с визуальной интерпретацией установлено, что линеаменты, извлечённые с помощью автоматической процедуры из изображения в поляризации VH S1A, подготовленного с помощью соотношения компонентов (рис. 4а, б), расположены между затенёнными и не затенёнными участками, наклонами и даже в

областях, не имеющих значения, классифицируемых как область затенения, имеющая откосы и структурные особенности (рис. 4в).

Следовательно, подтверждается высокая чувствительность радарных данных S1A к геоморфологическим структурам.

В исследованиях, посвященных анализу и картированию линеаментов, классификационная карта по плотности линеаментов широко используется для корреляционного анализа с выявленных структур с геологической информацией и их интерпретации в контексте геологического строения и истории развития исследуемого района [*eg. Hung et al., 2005b; Fagbohun et al., 2017*]. Классификационная карта предоставляет информацию о концентрации линеаментов на единицу площади [*Mostafa et al., 1995*]. Карты плотности линеаментов в этом исследовании получены с извлеченных линеаментов для анализа дисперсионной картины линеаментов (рис. 4г).

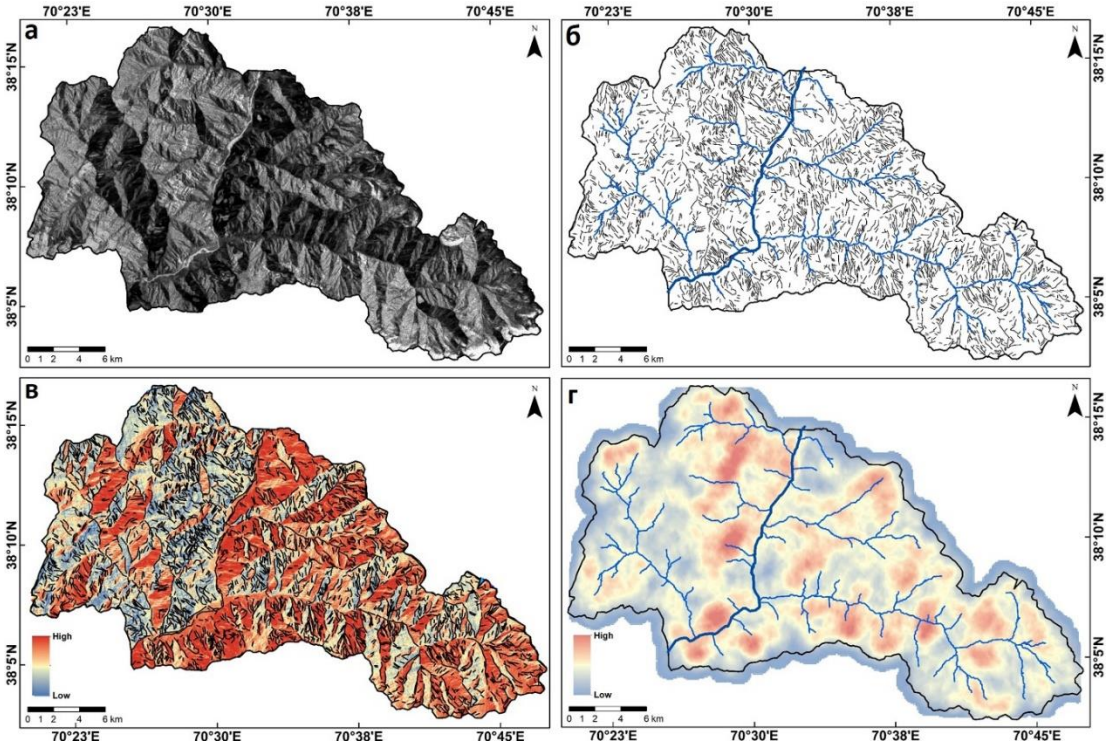

Рис. 7. а) Подготовленное изображение в поляризации S1A-VH путём соотношения (ratioing) двух компонентов. б) Карта автоматически извлечённых линеаментов района исследования. в) Суперпозиция извлечённых линеаментов на затененный рельеф. г) Карта плотности извлечённых линеаментов

Рис. 8. a) Prepared image in S1A-VH polarization by ratioing of two components. b) Map of automatically extracted lineaments of the study area. v) Superposition of the extracted lineaments on the shaded relief. g) Density map of the extracted lineaments

Более высокие значения плотности на карте представлены красным цветом, а более низкие значения - синим. Большинство значений высокой плотности линеаментов (рис. 4г) находятся в северной части изображения, где в основном обнажаются туфогенные породы, конгломераты и тела диоритов. Зоны более высокой плотности линеаментов могут отражать угол наклона горных склонов, которые контролируются литологическим строением района исследования. Следовательно, более высокая плотность линеаментов в северной части исследуемого участка может означать более высокий уровень деформации горных пород в этой части района исследования.

Выводы

В результате данного исследования достигнута основная цель – получение наиболее достоверной литологической и структурной информации о селеопасной зоне с использованием наборов оптических и радарных снимков Sentinel и цифровой обработки полученных изображений.

В процессе исследования внедрена техника цифровой обработки спутниковых снимков для литологического и линеаментного картирования селеопасной территории в приграничном между Таджикистаном и Афганистаном районе (запад Памирского плато).

Результаты обработки данных были сопоставлены с имеющейся геологической картой исследуемого района в масштабе 1: 200 000 [*Власов, 1963 Таджикистан*] и 1: 500 000 [*USGS, Афганистан*]. Изображение композита ложного цвета (11, 12 и 8) из снимка S2A и цветное композитное изображение независимых компонентов (IC5, IC4 и IC1) обеспечивают отличного качества различие между разными литологическими единицами в исследуемом районе.

Полученные результаты позволили выявить более мелкие тела и обнажения литологических единиц, ранее не нанесённые на картах во время предыдущих наземных картографических исследований, выполненных в основном в двадцатом столетии, и способствовали повышению точности существующих карт для исследованного района.

Следует отметить, что изображение S1A позволило довольно точно выявить и извлечь линеаменты из поляризации VH. Это подтверждает эффективность радарных изображений при автоматическом извлечении линеаментов, что в равной мере относится также к VH поляризации S1A и тому, что компоненты амплитуды и интенсивности этого изображения объединены вместе. Линеаменты, извлеченные из S1A, показывают высокую корреляцию с резкими изменениями в областях склона и затенения.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе и оценке опасности схождения оползней и развитии селепроявлений исследуемых территорий, горно-предгорной зоны.

Благодарности

Авторы благодарны Европейскому космическому агентству (ESA) за предоставление данных Sentinel-1 и Sentinel-2.

Список литературы

Abdullah A., Akhir J.M., et al. (2010). Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEMs) in the Maran–Sungi Lembing area, Malaysia. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15, 1-9

Adiri Z., el Harti A., et al. (2017). Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. Adv. Space Res., 60, 2355–2367.

Ali S. A., Ali U. (2013). Litho-Structural Mapping of Sind Catchment (Kashmir Basin), NW Himalaya, using Remote Sensing and GIS Techniques. International Journal of Science and Research (IJSR). Vol. 4, No. 7, 1325-1330.

Aminov J., Chen X., et al. (2018). Evaluation of Remote Sensing Techniques for Lithological Mapping in the Southeastern Pamir using Landsat 8 OLI Data. Int. J. Geoinform., 14, 1–10.

Aminov J., Xi C., et al. (2019). Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, S-E Pamir. Remote Sensing. 11, 778. https://doi.org/10.3390/rs11070778.

Asadzadeh S., de Souza Filho C. (2016). A Review on Spectral Processing Methods for Geological Remote Sensing. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation. Vol. 47. 69-90. doi:10.1016/j.jag.2015.12.004.

Berger M., Moreno J., et al. (2012). ESA's sentinel missions in support of Earth system science. Remote Sensing of Environment, 120, 84-90

Eldosouky A. M., Abdelkareem M., et al. (2017). Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt. Journal of African Earth Sciences, 130, 28-37

European Space Agency, Level-2A Prototype Processor for Atmosphericterrain and Cirrus Correction of Top-of-Atmosphere Level 1C Input Data. Available online: http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/ (accessed on 22 October 2017).

European Space Agency. The Copernicus Open Access Hub website. Available online: https://scihub.copernicus.eu/ (accessed on 20 Feb.2020).

Fagbohun B. J., Adeoti B., et al. (2017). Litho-structural analysis of eastern part of Ilesha schist belt, Southwestern Nigeria. J. Afr. Earth Sci., 133, 123–137.

Hung L.Q., Batelaan O., et al. (2005b). Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam, 5983, 59830T

Jutten C., Herault J. (1991). Blind Separation of Sources, Part I. An Adaptive Algorithm Based on Neuromimetic Architecture, Signal Processing. Vol. 24(1), 1-10.

Kim G. B., Lee J. Y., et al. (2004). Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue™ scripts. Computers & Geosciences, 30, 1117-1126

Lee J. S. (1981). Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics. Comput. Graph. Image Process., 15, 380–389.

Lee J. S., Mitchell G. R., et al. (1999). Polarimetric SAR Speckle Filtering and Its Implication for Classificatio. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37, 2363–2373.

Marghany M., Hashim M. (2010). Lineament Mapping Using Multispectral Remote Sensind Data Research. J. of Applied Sci., 5, 126-130

Masoud A., Koike K. (2006). Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. J. Afr. Earth Sci., 45, 467–477.

Mostafa M. E., Qari M.Y.H. (1995). An exact technique of counting lineaments. Eng. Geol., 39, 5–15.

Pour A. B., Hashim M. (2014). Structural geology mapping using PALSAR data in the Bau gold mining district, Sarawak, Malaysia. Advances in Space Research, 54, 644-654

Qari M. H. T. (2011). Utilizing Image Processing Techniques in Lithologic Discrimination of Buwatah Area, Western Arabian Shield, Arabian Journal of Geosciences. Vol. 4, 13-24. doi:10.1007/s12517-009-0049-x.

Rahnama M., Gloaguen R. (2014). TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction. Remote Sens., 6, 5938-5958

Ramli M. F., Yusof N., et al. (2010). Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69, 215-233

Saadi N. M., AbdelZaher M., et al. (2011). Integrated remote sensing data utilization for investigating structural and tectonic history of the Ghadames Basin, Libya. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 13, 778–791.

Sentinel-1 Toolbox, S.T. Available online: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1 (accessed on 22 October 2017).

Tempfli K., Kerle N., et al. (2009). Principles of Remote Sensing, 4th ed.; The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, (ITC): Enschede, The Netherlands.

USGS projects in Afghanistan Available online: https://afghanistan.cr.usgs.gov/ (accessed on 09 Jan. 2020).

Yang J., Cheng Q. (2014a). A Comparative Study of Independent Component Analysis with Principal Component Analysis in Geological Objects Identification. Part II : A Case Study of Pinghe District, Fujian, China. Journal of Geochemical Exploration. Vol. 149, 136-146. doi:10.1016/j.gexplo.2014.11.014.

Yang J., Cheng Q. (2014b). A Comparative Study of Independent Component Analysis with Principal Component Analysis in Geological Objects Identification, Part I : Simulations. Journal of Geochemical Exploration. Vol. 149, 127-135. doi:10.1016/j.gexplo.2014.11.

Власов Н. Г. (1963). Геологическая карта СССР (Шит # J-42-XVII), масштаб 1:200000.

Комитет охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан. Доступно онлайн: http://tajnature.tj/?page_id=156&lang=ru, (доступ к официальному веб-сайту 17. Янв. 2020).