



Исследование снежных лавин с помощью радиолокационных данных спутника Sentinel-1 (на примере Гиссаро-Алая)

Кисляк У.А. , Костенков Н.А. , Петраков Д.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Исследование лавинной деятельности в горных регионах является важным аспектом для обеспечения безопасности населения и защиты инфраструктуры. Особое внимание уделяется изучению лавин в труднодоступных и малоизученных горных районах, одним из которых является Гиссаро-Алай. Удаленность, труднодоступность и повышенная облачность в период наибольшей лавинной активности делают полевые наблюдения и использование оптических спутниковых снимков для исследования лавинной деятельности в Гиссаро-Алае крайне затруднительными. В таких условиях оптимальным решением становится применение радиолокационных технологий, позволяющих получать данные независимо от погодных условий и условий освещенности. В статье описывается методика обработки радиолокационных снимков спутника Sentinel-1, а также результаты дешифрования лавинных отложений, которые были получены для Зеравшанского, Гиссарского, Туркестанского и Алайского хребтов в сезоне 2021/2022 гг. Проведена верификация метода при помощи мультиспектральных данных со спутников группировки Sentinel-2. Для каждого из хребтов Гиссаро-Алая приведены особенности лавинной деятельности - распределение отдельных мест залегания лавинных отложений по абсолютной высоте, крутизне и экспозиции склонов.

Подана в редакцию:
19 февраля 2024

Принята к публикации:
28 мая 2025

Доступ онлайн:
17 июня 2025

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

снежные лавины, Гиссаро-Алай, радиолокационные снимки Sentinel-1, данные дистанционного зондирования Земли, дешифрирование лавинных отложений, мониторинг лавинной активности

1. Введение

Лавины отмечаются повсюду, где средняя толщина снежного покрова хотя бы эпизодически превышает 30-40 см и имеются склоны крутизной от 25° и относительной высотой более 40-50 м (Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, 1997). К высокой лавинной активности на Гиссаро-Алае приводят наличие крутых склонов, значительного количества твердых осадков, а также отсутствие густой древесной растительности. Период наибольшей лавинной активности в районах альпийского высокогорья Алайского, Туркестанского и Зеравшанского хребтов, входящих в состав этой горной системы, отмечается с конца декабря по конец апреля и связан во многом с метелевым перераспределением снега, потеплением весной, а также с обильными снегопадами. Интенсивное снегонакопление ведет к частому сходу лавин большого объема, достигающих в некоторых районах более 100 тыс. м³ (Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, 1997). Регулярные наблюдения за лавинной активностью на территории горной страны необходимы для обеспечения безопасности местного населения, туристов, а также для проектирования и обеспечения безопасности инфраструктуры. Для определения признаков лавинной активности используют оптические снимки спутников Landsat 8, Landsat 9, Sentinel-2A, Sentinel-2B и др., на которых видны конусы выноса лавин, лавинные снежники и прочесы, что, в свою очередь, указывает на существование лавиносборов, которые определяются дополнительно (Hafner et al., 2021; Wen et al., 2024; Abhinav et al., 2025). Зачастую получение качественных оптических данных невозможно из-за неблагоприятных условий освещенности (темное время суток) или видимости (густая облачность, закрывающая объект исследования). При отсутствии мультиспектральных оптических снимков высокого и сверхвысокого разрешения, корректно отражающих актуальную лавинную «обстановку», следует использовать альтернативные методы исследования. Одним из таких методов является дешифрирование признаков лавинной активности при помощи радиолокационных снимков спутниковой системы Sentinel-1, подходящих для регулярного космического мониторинга.

Целью исследования стало выявление лавинных отложений и особенностей лавинной деятельности (распределение лавинных отложений по высоте, экспозиции и крутизне склонов) в Гиссаро-Алае в сезоне 2021/2022 гг. при помощи радиолокационных снимков Sentinel-1. В ходе работы проанализированы существующие методики обработки радарных данных, а также предложен наиболее оптимальный для целей снеголавинных исследований способ обработки радиолокационных снимков.

2. Опыт исследования лавин при помощи данных дистанционного зондирования Земли

Потенциал дистанционного зондирования был обнаружен на ранней стадии развития науки о снеге - он использовался для сбора данных из космоса (Chang et al., 1982; Dozier, 1989; Hall et al., 2002). В одних из первых работ, посвященных дистанционному зондированию снежного покрова, внимание было сосредоточено на дешифрировании покрытых снегом поверхностей при помощи оптических мультиспектральных снимков. Как отмечалось в работе Dozier (1989), главной задачей картирования скоплений лавинных отложений на основе анализа оптических снимков было отличить снег от других покровов и облаков, а также компенсировать влияние атмосферы и неровностей рельефа в различных диапазонах съемки.

В настоящее время для дистанционного зондирования лавинных отложений применяются оптические датчики, лазерные локаторы LiDAR и радарные датчики, которые используют определенные части длины волны электромагнитного спектра для получения изображений. В связи с различиями в получении данных каждая из упомянутых методик имеет разный потенциал использования. Наибольшей применимостью для целей дистанционного мониторинга лавинной деятельности обладают данные, получаемые именно с радиолокационных космических спутников (Eckerstorfer et al., 2016). Преимущество этого вида съемки перед оптической заключается в том, что она не зависит от освещенности и облачности - радиолокационные снимки можно получать даже при скоплении облаков в области исследования и в условиях полярной ночи (рис. 1).



Рис. 1. Преимущества использования данных с радиолокационных космических спутников группировки Sentinel-1 для обнаружения лавин (Leinss et al., 2020)

Дешифрирование лавинных отложений при помощи радиолокационных данных проводилось специалистами различных регионов мира. Так, в работе Yang et al. (2020) производилось автоматическое дешифрирование лавин на Западном Тянь-Шане при помощи продуктов спутников группировки Sentinel-1. В результате вероятность обнаружения лавин составила более 0,75, а вероятность ошибки - менее 0,34 для всего региона.

В работах Eckerstorfer et al. (2016, 2017, 2021, 2022) приводятся примеры успешного использования радиолокационных данных для дешифрирования следов схода в основном мокрых лавин и заостряется внимание на крайне низкой вероятности корректного дешифрирования отложений сухих лавин (Eckerstorfer et al., 2022).

Статья Bianchi (1992) посвящена дешифрированию лавинных отложений в горных районах Норвегии при помощи обучения нейронной сети на примерах выделенных вручную лавин. В результате лишь небольшие лавины остались не отмеченными, тогда как некоторые, не выделенные вручную, были обнаружены.

Tompkin и Leinss (2021) исследовали особенности режима съемки спутников группировки Sentinel-1, которые способствуют корректному обнаружению лавинных отложений. Было установлено, что наиболее четко они выделяются на склонах, обращенных от съемочной системы при местных углах наклона $55^{\circ} \pm 20^{\circ}$. Также в работе говорится о возможности обнаружения следов лавин в течение 18-дневного периода после их схода, поскольку далее в результате подтаивания или перекрытия снегопадами некогда «свежих» лавинных отложений их дешифрирование становится проблематичным.

Дешифрирование лавинных отложений по радиолокационным данным производилось не только с помощью снимков со спутниковой группировки Sentinel-1, но и при помощи данных сверхвысокого разрешения спутника TerraSAR-X (Leinss et al., 2020). Исследование показало, что результаты дешифрирования по данным спутникам согласуемы и одинаково корректны.

В последние годы были предложены новые успешные методики полуавтоматизированного дешифрирования лавинных отложений (Sartori, 2023), которые позволили еще более широко использовать радиолокационные данные для целей лавинных исследований.

Существующие методики работы с радиолокационными снимками при дешифрировании лавин основываются на способности космических аппаратов Sentinel-1A и Sentinel-1B излучать в С-диапазоне. В общем случае радиоволны С-диапазона «пробивают» снежный покров и отражаются от поверхности земли (Балдина, Трошко, 2017). В зависимости от свойств снежного покрова меняется сигнал обратного рассеяния радара, что отражается на радиолокационных снимках. Предполагается, что лавинные отложения имеют более высокие значения обратного рассеяния по сравнению с окружающей поверхностью за счет своей шероховатости и влажности (Karas et al., 2021) (рис. 2).

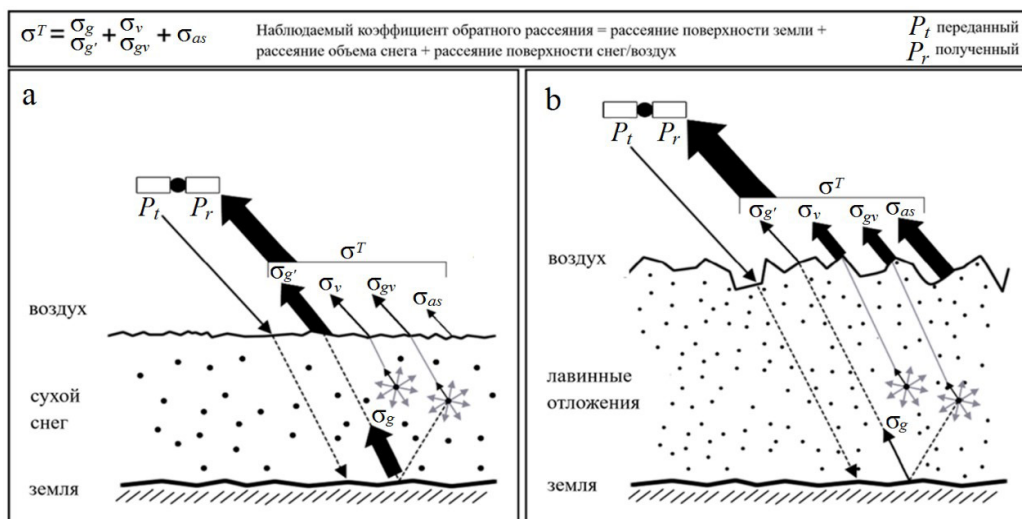


Рис. 2. Обратное радиолокационное рассеяние от сухого нетронутого снега, состоящее в основном из рассеяния поверхности земли (а), и от лавинных отложений, где в общем обратном рассеянии преобладает вклад неровной снежной поверхности (б) (Eckerstorfer, Grahn, 2021)

Следует учитывать, что радиоволны по-разному распространяются в сухом и мокром снегу. Это, безусловно, отражается на результатах дешифрирования лавинных отложений. Вероятность обнаружения лавин и ошибки при использовании изображений с радаров с синтезированной апертурой (Synthetic Aperture Radar - SAR) напрямую зависит от размера снежной лавины и ее типа (рис. 3).

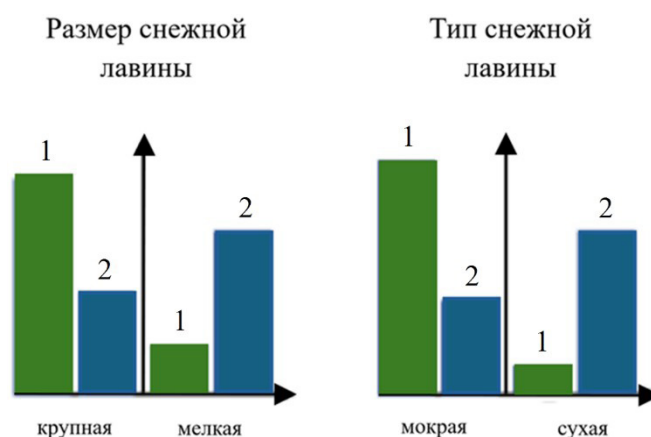


Рис. 3. Зависимость точности дешифрирования лавинных отложений при помощи снимков Sentinel-1 от характеристик лавин (Eckerstorfer, Grahn, 2021). Обозначения: 1 - вероятность обнаружения лавин; 2- вероятность ошибки

Отложения крупных мокрых лавин наиболее точно идентифицируются на радиолокационных снимках, в то время как оценить точность дешифрирования следов мелких сухих лавин достаточно сложно. В связи с тем, что в районе исследования на протяжении всего периода лавинной активности наблюдается сход крупных мокрых лавин (Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, 1997), их исследование возможно при помощи радиолокационных снимков.

3. Материалы и методы

3.1. Данные спутников группировки Sentinel-1

Для данной работы были выбраны 24 снимка Sentinel-1 формата GRD (Ground Range Detected) с одинарной VV (вертикальной) поляризацией за сезон 2021/2022 гг., полученных с 22 сентября 2021 г. по 25 июня 2022 г., т. е. в период лавинной активности исследуемого региона (География лавин, 1992). Формат GRD выбран по причине меньшего объема по сравнению с форматом SLC (Single Look Complex), а также потому, что снимки GRD представляют собой сфокусированные данные в координатах «наземная дальность · путевая дальность» без фазовой информации (Кашницкий и др., 2016). VV-поляризация выбрана в связи с тем, что она лучше зарекомендовала себя в достижении целей дешифрирования водных объектов, в то время как кросс-поляризация (VH или HV) больше подходит для дешифрирования различных типов растительности (European Space Agency. Sentinel-1 User handbook, 2013).

Все снимки были получены по восходящей орбите движения спутников, а их локализация по NASA's Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (ASF DAAC), откуда и были получены данные, определяется 126-м участком по долготе и 173-м - по широте (рис. 4).

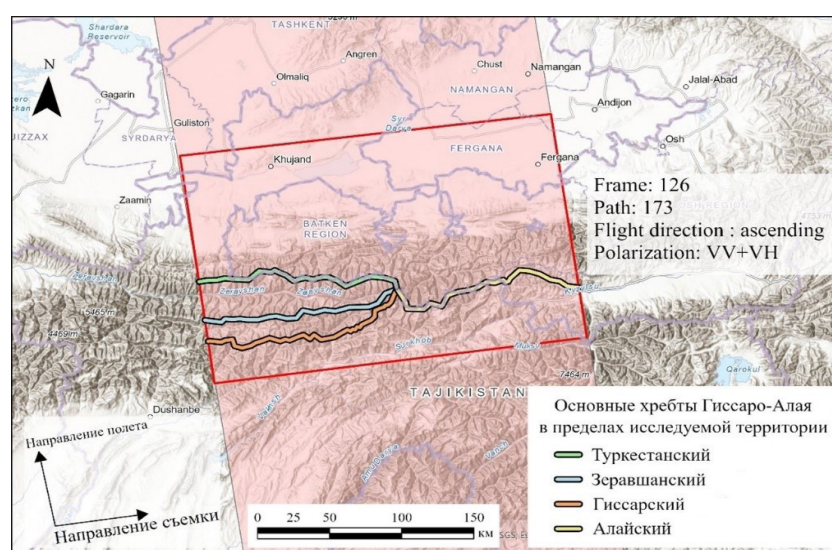


Рис. 4. Зона покрытия используемых в работе снимков Sentinel-1

В настоящей работе использовались снимки только восходящей орбиты из-за значительно меньшей (по сравнению с нисходящей) площади радиолокационных теней на лавиноопасных склонах. Выбранный участок покрытия радиолокационными снимками практически полностью охватывает район исследования. Из-за значительного объема информации и длительного процесса обработки, соседние снимки не использовались.

3.2. Обработка радиолокационных данных

Все 25 снимков были попарно обработаны при помощи программы SNAP (рис. 5).



Рис. 5. Граф обработки снимков Sentinel-1 в программном обеспечении SNAP

Результатом обработки материалов радиолокационной съемки стали откалиброванные (со значением каждого пикселя, отражающего обратное рассеяние сигнала радара сцены), ортотрансформированные со сглаженным спекл-шумом (интерференционной зернистостью на радиолокационных изображениях), пригодные для дальнейшего анализа снимки. Следующим этапом стало создание цветного изображения. Для этого были составлены композиции каналов из более ранних и более поздних соседних радиолокационных снимков: «более поздняя дата съемки» + «более ранняя дата съемки» + «более ранняя дата съемки».

В результате были получены синтезированные изображения, на которых красным и синим цветом разной интенсивности выделялись разновозрастные лавинные отложения. «Свежие» накопления отображаются красными оттенками из-за увеличивающегося сигнала обратного рассеяния (Leinss et al., 2020) (рис. 6, 7).

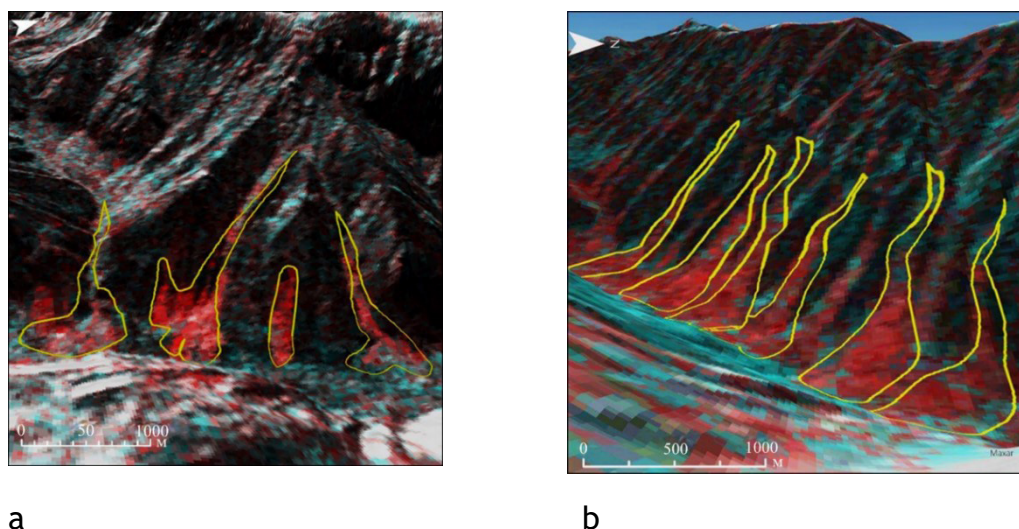


Рис. 6. Результат дешифрирования лавинных отложений на примере снимков Sentinel-1A за 09.03.2022 (a) и 21.03.2022 (b) - 3D представление

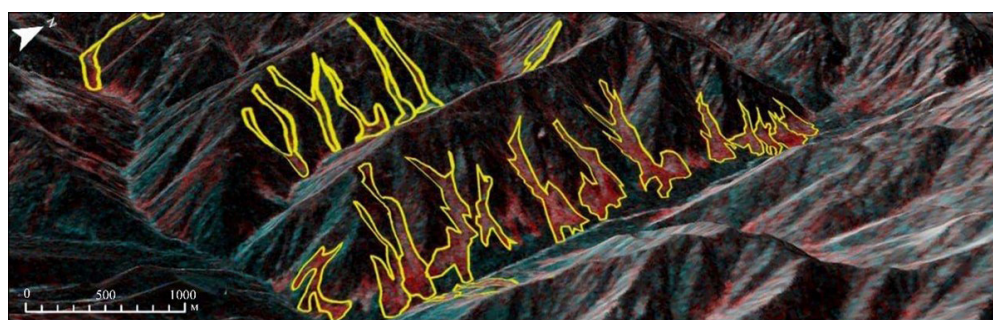


Рис. 7. Результат дешифрирования лавинных отложений в отдельной долине на примере снимков Sentinel-1A за 09.03.2022 и 21.03.2022 - 3D представление

3.3. Данные со спутников группировки Sentinel-2

Для верификации мест скопления лавинных отложений, полученных в результате обработки радиолокационных данных, использовались оптические снимки со спутников группировки Sentinel-2 (Copernicus Data Space Ecosystem). Все 1016 скоплений, выделенных вручную на радиолокационных снимках, были обнаружены на 8 из 12 выбранных оптических изображений. Следует отметить, что несмотря на предварительно проведенную «селекцию» оптических снимков, повышенная облачность, закрывающая отдельные участки исследуемой территории, препятствовала получению качественных данных (рис. 8).

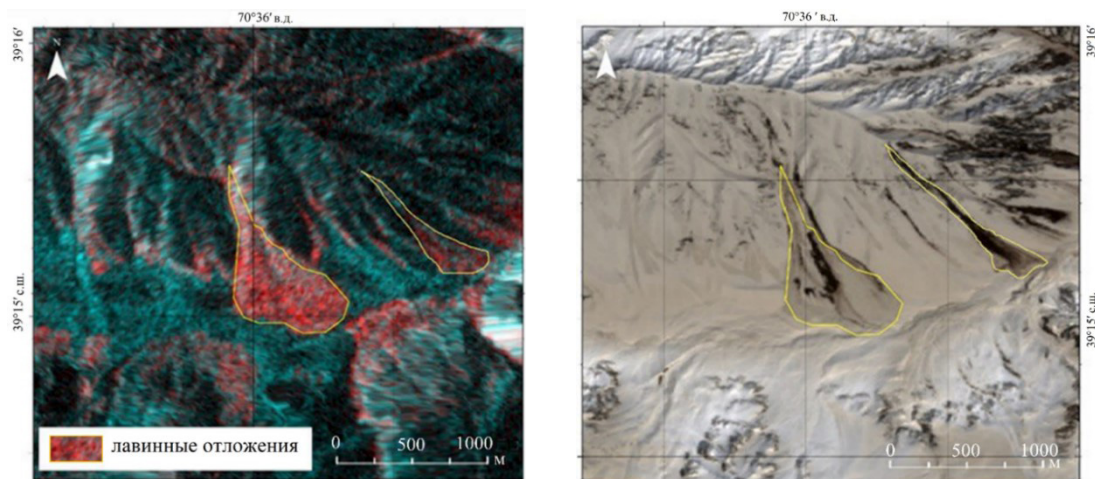


Рис. 8. Сравнение полученного после обработки радиолокационного снимка Sentinel-1 (R-канал - 21.03.2022; G, B-каналы - 09.03.2022) (a); оптического снимка Sentinel-2 (06.04.2022) (b)

Однако в некоторых случаях, когда на заданную территорию и период времени не было доступных качественных оптических данных, верификацию выполнить было невозможно.

4. Получение данных об особенностях схода лавин

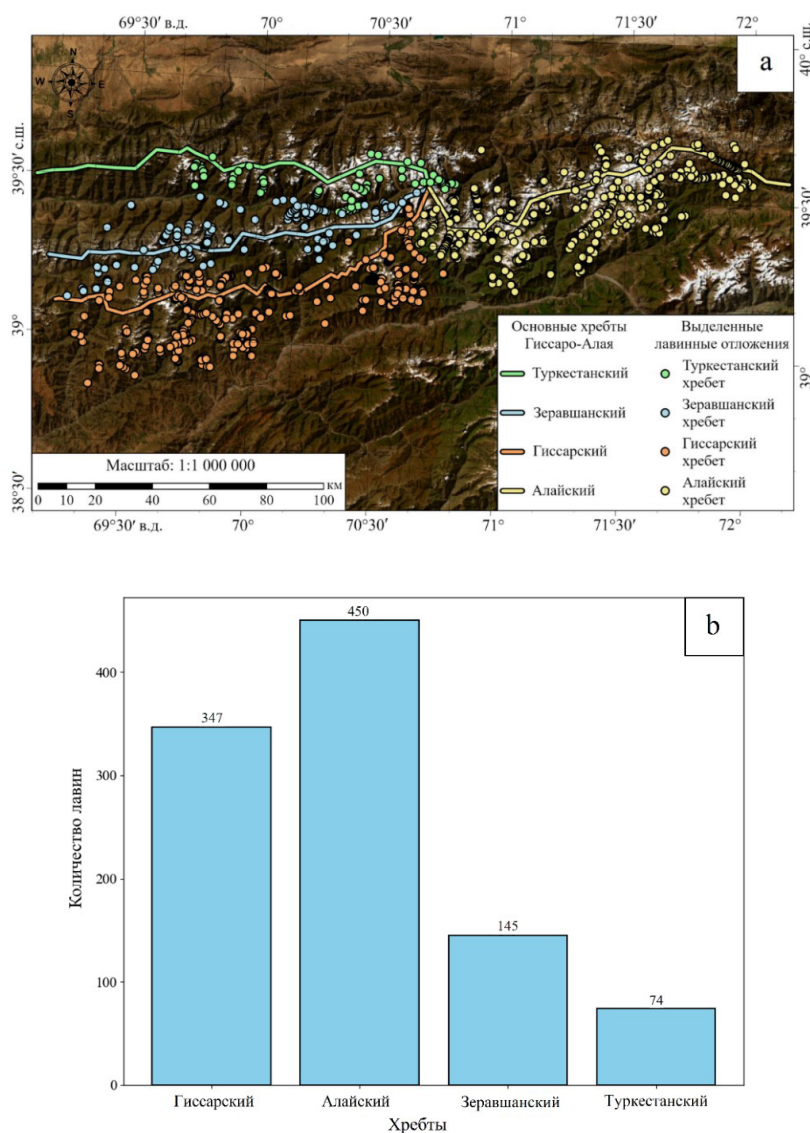
После обработки 25 радиолокационных снимков и получения композиций каналов было произведено визуальное дешифрирование лавинных отложений по прямым структурным (шероховатая текстура), яркостным (уровень яркости - красный и синий), геометрическим («конусовидная», «канализированная» форма) и косвенным (индикаторы лавин - наличие форм рельефа, благоприятных для схода лавин, таких как денудационные воронки, деформированные кары и эрозионные врезы) признакам (см. рис. 6, 7).

В ходе дешифрирования было выделено 1016 отдельных скоплений лавинных отложений на Туркестанском, Зеравшанском, Гиссарском и Алайском хребтах. При помощи цифровой модели рельефа FABDEM с разрешением 30 м и применения инструмента вычисления зональной статистики, выполняющего расчет статистики значений пикселей раstra для полигонов векторного слоя, были получены данные о высоте, углах наклона и экспозиции склонов, на которых залежали лавинные отложения в Гиссаро-Алае в сезоне 2021/2022 гг. При этом процесс вычисления указанных статистических полей был автоматизирован при помощи написанного на языке программирования Python кода.

5. Особенности схода лавин в Гиссаро-Алае в сезоне 2021/2022 гг.

В ходе исследования были установлены и проанализированы следующие параметры сошедших лавин: диапазон высот, на которых зафиксированы лавинные отложения, градация их углов наклона, а также экспозиции склонов, по которым в сезоне 2021/2022 гг. сходило наибольшее количество лавин. Все данные были получены по каждому из четырех хребтов Гиссаро-Алая - Туркестанскому, Зеравшанскому, Гиссарскому и Алайскому.

Наибольшее количество выделенных лавинных отложений было зарегистрировано на Алайском хребте (450), наименьшее - на Туркестанском (74). При этом максимальное число лавин на километр протяженности выявлено на Алайском хребте (2,9 на 1 км), наименьшее - также на Туркестанском (0,5 на 1 км) (рис. 9).



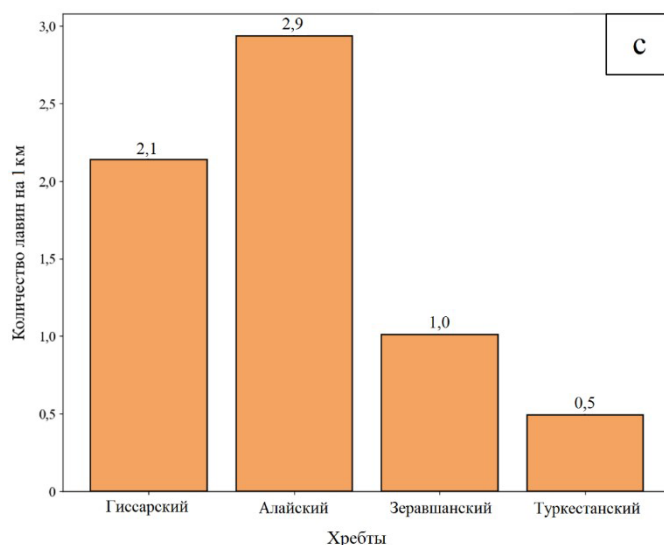


Рис. 9. Результаты исследования снежных лавин Гиссаро-Алая. Распределение выделенных лавинных отложений в пределах исследуемой территории (а), количество зафиксированных мест скопления лавинных отложений по хребтам (б) и на 1 км их протяженности (с)

Важной характеристикой сошедших в сезоне 2021/2022 гг. лавин являлась экспозиция склонов, где они наблюдались. Среди экспозиций склонов, по которым сходили лавины в Гиссаро-Алае за исследуемый период, преобладали восточная и юго-восточная - более 60 % выделенных скоплений лавинных отложений. Такая особенность связана в первую очередь с орографическими особенностями хребтов - подветренным положением склонов восточной и юго-восточной экспозиции. Фактическое отсутствие лавинных отложений на склонах северной экспозиции объясняется ограничением метода радиолокационной съемки - по восходящей орбите в районе Гиссаро-Алая радиолокационная тень приходится преимущественно на склоны северной экспозиции. Это приводит к потере сигнала и невозможности достоверного выделения лавинных отложений в данных областях. Еще одной характеристикой лавин, сошедших в Гиссаро-Алае в сезоне 2021/2022 гг., была средняя абсолютная высота залегания лавинных отложений, обнаруженных в процессе дешифрирования. В среднем по всем четырем хребтам Гиссаро-Алая лавинные отложения были зафиксированы на высотах от 1364 до 4451 м н.у.м. Средняя высота их залегания составила 2984 м н.у.м. Наибольшее количество лавинных отложений находилось в диапазоне высот 2750-3500 м н.у.м.

В ходе работы дополнительно определялся средний угол наклона зон отложения лавин. В подавляющем большинстве случаев выделенные границы лавин полностью захватывали зону аккумуляции и в меньшей степени - зону

транзита. Как правило, это крупные эрозионные врезы и, в меньшей степени, денудационные воронки и деформированные кары. Так, средняя крутизна участков склонов, на которых располагались лавинные отложения, составила $1,5^{\circ}$ – $38,0^{\circ}$, наибольшее же количество выделенных скоплений относится к участкам склонов крутизной $20,0^{\circ}$ – $34,0^{\circ}$. Это несколько превышает характерные для зон аккумуляции (0° – 20°) и транзита (20° – 25°) значения угла наклона поверхности в соответствии с СП 428.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования». Такая особенность может быть связана с «крутостенностью» хребтов Гиссаро-Алая, а также с небольшим объемом сходящих лавин, которые останавливались на достаточно крутых участках склонов.

6. Заключение

На основе визуального дешифрирования радиолокационных данных со спутников группировки Sentinel-1 в сезоне 2021/2022 гг. было зафиксировано 1016 лавин в горах Гиссаро-Алая. Достоверность выделенных лавинных отложений была верифицирована при помощи визуального дешифрирования оптических снимков со спутников группировки Sentinel-2.

Наибольшее количество лавин было зафиксировано на Алайском хребте, а наименьшее – на Туркестанском, что обусловлено климатическими и орографическими особенностями горной страны. Более 80 % зафиксированных в сезоне 2021/2022 гг. лавин приходилось на март – апрель, что коррелирует с ранее опубликованными результатами (Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, 1997).

На основе анализа цифровой модели рельефа FABDEM установлено, что наибольшее количество лавин сходило в диапазоне высот 2750–3500 м н.у.м. Более 60 % лавин сходило со склонов восточной и юго-восточной экспозиции, что, скорее всего, связано с их подветренным положением. Выделенные лавинные отложения располагались преимущественно на склонах крутизной 20° – 34° , что несколько превышает используемые в нормативных документах значения угла наклона поверхности (0° – 20° для зоны аккумуляции и 20° – 25° для зоны транзита).

Было установлено, что использование спутниковых снимков Sentinel-1 позволяет производить оперативный мониторинг лавинной деятельности на значительной по площади горной территории. Свободный доступ, частота обновления, большое пространственное покрытие и разрешение снимков делает данные со спутников группировки Sentinel-1 одним из лучших инструментов для исследования лавинной деятельности горных районов. Однако существенным ограничением метода является наличие радиолокационной тени – получение качественных данных о лавинах в зонах ее распространения маловероятно.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам за ценные замечания. Исследование выполнено по теме государственного задания № 121051100164-0 «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии».

Список литературы

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира (1997). Ред. Котляков В.М. М.: Институт географии РАН, НПП «Картография», т. I
- Балдина, Е.А., Трошко, К.А. (2017). Радиолокационные данные в географических исследованиях и картографировании. М.: Изд-во МГУ
- География лавин (1992). Ред. Мягков С.М., Канаев Л.А. М.: Изд-во МГУ
- Кашницкий, А.В., Бриль, А.А., Бурцев, М.Ю., Самофал, Е.В., Уваров, И.А., Матвеев, А.М. (2016). Возможности работы с данными спутника Sentinel-1 в информационной системе VEGA-Science. *Сборник тезисов докладов XIV Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*, 84
- Abhinav, A., Sharma, A., Dhamija, S., Negi, H.S. (2025). Avalanche debris detection from Sentinel-2 data using fuzzy machine learning and colour spaces for the Indian Himalaya. *Remote Sensing Letters*, 16 (6), 606-618. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2025.2488532>
- Bianchi, F.M., Grahn, J., Eckerstorfer, M., Malnes, E., Vickers, H. (2021). Snow avalanche segmentation in SAR images fully convolutional neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 75-82. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3036914>
- Chang, A.T., Foster, J.L., Hall, D.K., Rango, A., Hartline, B.K. (1982). Snow water equivalent estimation by microwave radiometry. *Cold Regions Science and Technology*, 5(3), 259-267. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(82\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0165-232X(82)90019-2)
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of Alpine cover from the LANDSAT thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 45, 9-22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Eckerstorfer, M., Bühler, Y., Frauenfelder, R., Malnes, E. (2016). Remote sensing of snow avalanches: recent advances, potential, and limitations. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.001>
- Eckerstorfer, M., Malnes, E., Müller, K. (2017). A complete snow avalanche activity record from a Norwegian forecasting region using Sentinel-1 satellite-radar data. *Cold Regions Science and Technology*, 144(1), 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.004>
- Eckerstorfer, M., Grahn, J. (2021). Snow avalanche detection using Sentinel-1 in Langtang, Nepal. *NORCE climate report 3-2021*. URL: <https://norcereasearch.braze.unit.no/norcereasearch-xmlui/handle/11250/2991792> (date of request: 18.08.2023)
- Eckerstorfer, M., Oterhals, H.D., Müller, K., Malnes, E., Grahn, J., Langeland, S., Velsand, P. (2022). Performance of manual and automatic detection of dry snow avalanches in Sentinel-1 SAR images. *Cold Regions Science and Technology*, 198(23): 103549. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103549>
- European Space Agency (2013). Sentinel-1 User handbook, Issue 1, Rev. 0, GMES-S1OP-EOPG-TN-13-0001
- Hafner, E.D., Techel, F., Leinss, S., Bühler, Y. (2021). Mapping avalanches with satellites - evaluation of performance and completeness. *The Cryosphere*, 15(2), 983-1004. <https://doi.org/10.5194/tc-15-983-2021>
- Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V., DiGirolamo, N.E., Bayr, K.J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 181-194, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0)

- Karas, A., Karbou, F., Giffard-Roisin, S., Durand, P., Eckert, N. (2021). Automatic color detection-based method applied to Sentinel-1 SAR images for snow avalanche debris monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-17/5219117. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3131853>
- Leinss, S., Wicki, R., Holenstein, S., Baffelli, S., Bühler, Y. (2020). Snow avalanche detection and mapping in multitemporal and multiorbital radar images from TerraSAR-X and Sentinel-1. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1783-1803. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1783-2020>
- Official site NASA's Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (2023). URL: <https://search.asf.alaska.edu/> (date of request: 05.08.2023)
- Official site Copernicus Data Space Ecosystem (2023). URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (date of request: 09.08.2023)
- Sartori, M. (2023). Assessing the applicability of Sentinel-1 SAR data for semi-automatic detection of snow avalanche debris. MSc Thesis, University of Salzburg, Salzburg, Austria
- Tompkin, C., Leinss, S. (2021). Backscatter characteristics of snow avalanches for mapping with local resolution weighting. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 4452-4464, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3074418>
- Wen, H., Wu, X., Shu, X., Wang, D., Zhao, S., Zhou, G., Li, X. (2024). Spatial heterogeneity and temporal tendency of channeled snow avalanche activity retrieved from Landsat images in the maritime snow climate of the Parlung Tsangpo catchment, southeastern Tibet. *Cold Regions Science and Technology*, 223, 104206. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104206>
- Yang, J., Li, C., Li, L., Ding, J., Zhang, R., Han, T., Liu, Y. (2020). Automatic detection of regional snow avalanches with scattering and interference of C-band SAR Data. *Remote Sensing*, 12(17), ID 2781. <https://doi.org/10.3390/rs12172781>

Examining snow avalanches using Sentinel-1 radar data: case of Gissar-Alai Mountain Range

Kislyak U. A. * , Kostenkov N.A. , Petrakov D.A. 

Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

*Email: uakislyak@gmail.com

<https://doi.org/10.29258/CAJWR/2025-R1.v11-1/106-122.rus>

ABSTRACT

The investigation of avalanche activity in mountainous regions manifests an important aspect of public and infrastructure safety and protection, with particular attention to avalanches in hard-to-reach and poorly studied areas, like the Gissar-Alai Mountain Range. Remoteness, inaccessibility and increased cloudiness during the high avalanche season make field observations and applying optical satellite imagery for studying the avalanche activity in the Gissar-Alai extremely difficult. In such setting, radar technologies allowing to receive data regardless of weather and lighting conditions offer the best solution. The article describes the methodology for processing radar images of the Sentinel-1 satellite, as well as the results of decoding avalanche deposits in the Zeravshan, Gissar, Turkestan and Alai Ranges during the 2021-2022 season. The method underwent verification based on the Sentinel-2 multispectral data. In addition, the article characterizes the peculiar features of avalanche activity for each of the Gissar-Alai ridges, including the distribution of avalanche deposit zones by absolute heights, as well as slope steepness and exposure.

ARTICLE HISTORY

Received: February 19, 2024

Accepted: May 28, 2025

Published: June 17, 2025

KEYWORDS

snow avalanches, Gissar-Alai, Sentinel-1 radar images, remote sensing data, avalanche deposit decoding, avalanche activity monitoring

References

- Abhinav A., Sharma A., Dhamija S., Negi H. S., 2025. Avalanche debris detection from Sentinel-2 data using fuzzy machine learning and colour spaces for the Indian Himalaya. *Remote Sensing Letters*, Vol. 16, №. 6, pp. 606-618, <https://doi.org/10.1080/2150704X.2025.2488532>
- Baldina E.A., Troshko K.A., 2017. Radiolokacionnye dannye v geograficheskikh issledovaniyah i kartografirovanii, pod red. I.A. Labutinoj. [Radar data in geographical research and mapping] Izdatelstvo MGU, Moskva (in Russian)
- Bianchi F.M., Grahn J., Eckerstorfer M., Malnes E., Vickers H., 2021. Snow avalanche segmentation in SAR images fully convolutional neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 14, pp. 75-82, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3036914>
- Chang A.T., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Hartline B.K., 1982. Snow water equivalent estimation by microwave radiometry. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 5, Issue 3, pp. 259-267, [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(82\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0165-232X(82)90019-2)
- Dozier J., 1989. Spectral signature of Alpine cover from the LANDSAT thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 45, pp. 9-22, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Eckerstorfer M., Bühler Y., Frauenfelder R., Malnes E., 2016. Remote sensing of snow avalanches: recent advances, potential, and limitations. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 121, pp. 126-140, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.001>
- Eckerstorfer M., Grahn J., 2021. Snow avalanche detection using Sentinel-1 in Langtang, Nepal. NORCE climate report 3-2021. URL: <https://norce-research.brage.unit.no/norce-research-xmlui/handle/11250/2991792> (date of request: 18.08.2023).
- Eckerstorfer M., Malnes E., Müller K., 2017. A complete snow avalanche activity record from a Norwegian forecasting region using Sentinel-1 satellite-radar data. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 144, pp. 39-51, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.004>
- Eckerstorfer M., Oterhals H.D., Müller K., Malnes E., Grahn J., Langeland S., Velsand P., 2022. Performance of manual and automatic detection of dry snow avalanches in Sentinel-1 SAR images. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 198, ID 103549, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103549>
- European Space Agency, 2013. Sentinel-1 user handbook, Issue 1, Rev. 0, GMES-S1OP-EOPG-TN-13-0001
- Hafner E. D., Techel F., Leinss S., Bühler, Y., 2021. Mapping avalanches with satellites-evaluation of performance and completeness. *The Cryosphere*, Vol. 15(2), pp. 983-1004
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., DiGirolamo N.E., Bayr K.J., 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, Issues 1-2, pp. 181-194, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0)
- Karas A., Karbou F., Giffard-Roisin S., Durand P., Eckert N., 2021. Automatic color detection-based method applied to Sentinel-1 SAR images for snow avalanche debris monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 60, ID 5219117, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3131853>
- Kashnickij A.V., Bril' A.A., Burcev M.Ju., Samofal E.V., Uvarov I.A., Matveev A.M., 2016. Vozmozhnosti raboty s dannymi sputnika Sentinel-1 v informacionnoj sisteme VEGA-Science. [Opportunities of working with Sentinel-1 satellite data in the VEGA-Science information system] *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, Sbornik tezisev dokladov Chetyrnadcatoj Vserossijskoj otkrytoj konferencii*, Moskva, 84 (in Russian)
- Kotljakov V.M. (red.), 1997. Atlas snezhno-ledovykh resursov mira. [World atlas of snow and ice resources] Izdatelstvo Instituta geografii RAN, Moskva, 342 (in Russian)
- Leinss S., Wicki R., Holenstein S., Baffelli S., Bühler Y., 2020. Snow avalanche detection and mapping in multitemporal and multiorbital radar images from TerraSAR-X and Sentinel-1. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 20, No. 6, pp. 1783-1803, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1783-2020>

- Mjagkov S.M., Kanaev L.A. (red.), 1992. Geografija lavin. [Geography of avalanches] Izdatelstvo MGU, Moskva (in Russian)
- Official site NASA's Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center, 2023. URL: <https://search.asf.alaska.edu/> (date of request: 05.08.2023)
- Official site Copernicus Data Space Ecosystem, 2023. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (date of request: 09.08.2023)
- Sartori M., 2023. Assessing the applicability of Sentinel-1 SAR data for semi-automatic detection of snow avalanche debris. MSc Thesis, University of Salzburg, Salzburg, Austria
- Tompkin C., Leinss S., 2021. Backscatter characteristics of snow avalanches for mapping with local resolution weighting. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 14, pp. 4452-4464, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3074418>
- WenH., Wu X., Shu X., Wang D., Zhao S., Zhou G., Li X., 2024. Spatial heterogeneity and temporal tendency of channeled snow avalanche activity retrieved from Landsat images in the maritime snow climate of the Parlung Tsangpo catchment, southeastern Tibet. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 223, 104206, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104206>
- Yang J., Li C., Li L., Ding J., Zhang R., Han T., Liu Y., 2020. Automatic detection of regional snow avalanches with scattering and interference of C-band SAR Data. *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 17, ID 2781, <https://doi.org/10.3390/rs12172781>