

### III. ПРИРОДНИЧА ГЕОГРАФІЯ: ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА

УДК 551.578.482; 528.873

*Грищенко Михаил Юрьевич,*  
кандидат географических наук

*Горюнов Николай Дмитриевич*

*Турчанинова Алла Сергеевна,*  
кандидат географических наук

Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова,  
г. Москва, Россия, e-mail:  
m.gri@geogr.msu.ru  
Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова,  
г. Москва, Россия  
Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова,  
г. Москва, Россия

#### *ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЛАВИННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЛЕДНИКЕ БЕЗЕНГИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ СО СПУТНИКОВ SENTINEL-2*

*Целью* работы является оценка дешифровочных свойств снимков со спутника Sentinel-2 с точки зрения дешифрирования лавинных отложений на ледниках.

*Научная новизна.* Несмотря на порой довольно высокую значимость лавинных отложений в питании ледников, оценка применимости снимков со спутников Sentinel-2 для решения задачи выявления лавинных отложений на ледниках до сих пор не проведена.

*Методика.* В работе описаны основные методические приёмы дешифрирования по таким снимкам границ ледника, лавиносборов и лавинных отложений. Используются методы визуального дешифрирования снимков, синтезированных в различных вариантах цветопередачи.

*Результаты.* В ходе работы дана оценка пригодности использования снимков со спутников Sentinel-2 в исследованиях лавинного питания долинных ледников Кавказа, а также выявлены возможности и ограничения применения этих снимков для дешифрирования лавинных отложений в пределах ледников.

*Практическая значимость.* Полученные результаты позволят более эффективно оценивать лавинное питание ледников.

*Ключевые слова:* географическое дешифрирование, лавинные отложения, лавиносборы, ледники, Sentinel-2, Безенги.

UDC 551.578.482; 528.873

*Grishchenko Mikhail Yurievich,*  
Candidate of Geographical Sciences

*Goryunov Nikolay Dmitrievich*

*Turchaninova Alla Sergeevna,*  
Candidate of Geographical Sciences

Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia, e-mail:  
m.gri@geogr.msu.ru

Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia

Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia

## *AVALANCHE DEPOSITS REVEALING ON THE BEZENGI GLACIER USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES*

*Purpose.* The aim of the paper is to evaluate the interpretation properties of Sentinel-2 satellite images from the point of view of revealing avalanche deposits on glaciers.

*Scientific novelty.* Despite the sometimes quite high significance of avalanche deposits in the glaciers nourishment, the assessment of the Sentinel-2 satellites images applicability for solving the problem of detecting avalanche deposits on glaciers has not yet been carried out.

*Methods.* The paper describes the main methodological approaches of revealing by such images the boundaries of the glacier, avalanche paths and avalanche deposits. The methods of visual interpretation of images synthesized in various color renditions were used.

*Results.* During the work, an assessment was made of the suitability of using the Sentinel-2 images in studies of the Caucasus valley glaciers avalanche nourishment, as well as the possibilities and limitations of using these images for interpreting avalanche deposits within the glaciers were described.

*The practical significance.* The results will allow to more effectively evaluate the avalanche nourishment of glaciers.

*Keywords:* geographical images interpretation, avalanche deposits, avalanche paths, glaciers, Sentinel-2, Bezengi.

*Постановка проблемы.* Ледники являются одними из наиболее уязвимых объектов географической оболочки Земли, поэтому на фоне происходящих глобальных изменений климата особенно актуально их изучение. Питание ледников происходит за счет атмосферных осадков, метелевого переноса снега и схода снежных лавин. Однако величина и роль этих видов питания неодинакова на различных ледниках и в разные годы. Ледники с дополнительным питанием за счет лавинного снега широко распространены в различных горных областях. Под лавинным питанием ледника понимается количество снега, вынесенного лавинами на его поверхность. Доля лавинного питания представляет отношение количества лавинного снега к снегозапасам на теле ледника [Лосев, 1966]. Лавинное питание до сих пор является одним из наименее изученных компонентов приходной составляющей баланса массы ледников. Методы оценки лавинного питания ледников в настоящее время слабо проработаны, в то время как для некоторых ледников Кавказа доля лавинного питания в особо благоприятных условиях может достигать 50–60% [Панов, 1993], а для некоторых ледников Центральной Азии лавинное питание вообще является определяющим.

*Выделение нерешённых ранее частей общей проблемы.* Как правило, лавиноактивные склоны в долин ледников труднодоступны в течение почти всего года, поэтому наземные методы изучения лавинного питания ледников трудоёмки и порой опасны. Несмотря на то, что на данный момент достаточно точная оценка как объёма ледников, так и объёма приносимого лавинами снега возможны только в полевых условиях, аэрокосмические методы могут оптимизировать эти работы.

Космические снимки решают проблему труднодоступности изучаемых районов, при этом могут обеспечивать получение большого

количества оперативных и разносезонных данных. Дешифрирование лавин на ледниках осложняется рядом специфических проблем, таких как определение точных границ ледника, объёма (или хотя бы площади) лавинных отложений, участвующих в питании ледника, и т.д.

*Формулировка цели.* Целью работы является оценка дешифровочных свойств снимков со спутника Sentinel-2 с точки зрения дешифрирования лавинных отложений на ледниках. Для достижения цели необходимо решить ряд промежуточных задач, таких как обобщение актуальных методов дешифрирования горных ледников и их границ, лавиносборов и лавинных отложений, анализ большого количества космических снимков и выявление на них случаев схода лавин на ледники, оценка дешифровочных свойств снимков различных сезонов года.

В качестве объекта исследования выбран ледник Безенги, находящийся на северном макросклоне Главного Кавказского хребта. Безенги выбран в силу своего размера (крупнейший сложно-долинный ледник Северного Кавказа), расположения в зоне, благоприятной для возникновения лавин, а также в силу относительно хорошей изученности и одновременно крайне трудной доступности зоны его питания и окружающих ледник склонов. Рекомендации и методики, разработанные на его примере, могут быть в равной степени использованы и при исследованиях других ледников региона.

*Анализ последних исследований и публикаций.* Сошедшие лавины можно дешифрировать по зимним и летним (в высокогорных районах, где лавины сходят круглый год) снимкам или наблюдать в виде лавинных снежников на летних снимках.

На зимних снимках за лавину принимают следы видимых естественных подвижек снега на общем фоне ненарушенного снежного покрова [Акифьева, 1980]. Поверхность остановившейся лавины сильно отличается от ненарушенной поверхности снежного покрова наличием микрорельефа. Этот микрорельеф может быть выражен различными рисунками: мелкозернистым, «взбитой пены», зернистым, мелко-струйчатым или угловато-обломочным. Площадь лавинного тела может определяться по тени, если подстилающей поверхностью является снег, или по тёмному цвету освободившегося участка, если подстилающей поверхностью является грунт. При этом грунтовые лавины имеют более тёмный по сравнению с окружающим снежным покровом тон.

На летних снимках производится дешифрирование лавинных снежников, при этом важно знать их отличие от снежников другого происхождения. Светлый (от белого до серого) тон присущ всем снежникам. Снежники нелавинного происхождения, как правило, приурочены к местам ветровой аккумуляции, часто они имеют выпуклый профиль обтекаемой формы вдоль гребня или уступа [Акифьева, 1980]. Лавинные же отличаются разнообразием форм, размеров и местоположения. В отличие от нелавинных снежников, они могут быть сильно загрязнены и иметь достаточно тёмный тон

Для дешифрирования лавин наиболее подходящими считаются снимки очень высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, так как основные дешифровочный признак лавин – текстура и структура. Другим важным параметром при выборе космических снимков является их обновляемость и доступность [Eckerstofer et al., 2015].

Существует ряд сложностей, связанных с визуальным дешифрированием лавин. Одной из них является частая засвеченность снимков, это происходит при определенном сочетании рельефа с низкой высотой солнца в высоких широтах. Частично это может компенсировать автоматический алгоритм, разработанный Ларсеном и Латои основанный на материалах съёмки спутником QuickBird [Eckerstofer et al., 2015].

Помимо QuickBird, существует ряд спутников, таких как Ikonos, OrbView-3, WorldView-1 и 2, предоставляющих снимки высокого пространственного разрешения, но только на коммерческой основе. Начиная с 2013 года, спутник Landsat-8 предоставляет бесплатные данные высокого пространственного разрешения, в панхроматическом диапазоне разрешение составляет 15 м. Однако сегодня и это не предел - пара спутников Sentinel-2 проводит съёмку с пространственным разрешением 10 м в каналах оптического диапазона, снимки доступны на таких же условиях, что и снимки со спутников серии Landsat [Eckerstorfer et al, 2015]. Помимо снимков в оптическом диапазоне, для дешифрирования лавинных отложений могут быть использованы радиолокационные данные, получаемые со спутников Sentinel-1 [Eckerstorfer et al., 2017].

*Изложение основного материала.* В работе использованы снимки, полученные за всё время работы спутников Sentinel-2, то есть с 2015 года по настоящий момент. До октября 2017 года средний период обновления снимков на исследуемую территорию составлял 10 дней, с момента ввода в эксплуатацию второго спутника частота обновления снимков уменьшилась до 5 дней. Всего за время работы обоих спутников было сделано 147 снимков, на которых зафиксирована исследуемая территория. Однако часть этих снимков не пригодна для использования и дешифрирования в связи с высокой облачностью, зафиксированной на этих снимках.

*Таблица 1.*

*Распределение снимков разных типов перекрытия ледника Безенги облаками по месяцам*

	классы (см. текст)			
	1	2	3	4
<i>Январь</i>	5	1	3	8
<i>Февраль</i>	6	1	1	4
<i>Март</i>	3	1	3	5
<i>Апрель</i>	5	1	2	2
<i>Май</i>	0	0	1	8

<i>Июнь</i>	3	2	0	4
<i>Июль</i>	0	1	4	6
<i>Август</i>	2	3	2	5
<i>Сентябрь</i>	5	2	0	4
<i>Октябрь</i>	2	1	5	5
<i>Ноябрь</i>	9	0	1	3
<i>Декабрь</i>	6	0	1	9

Все снимки были разделены по уровню перекрытия исследуемого объекта (ледника Безенги) облачностью на четыре типа: снимки, на которых облачность над объектом полностью отсутствует; снимки, на которых облачность скрывает порядка 15% площади исследуемого объекта; снимки, на которых объект на 40% и более скрыт облаками, либо покрыт равномерной дымкой; снимки, на которых из-за облачности объект скрыт на 80% и более.

Из 147 снимков 48 относятся к первому типу, 13 - ко второму, 23 - к третьему и 63 - к четвёртому. Устойчивой закономерности между облачностью и сезоном года не наблюдается (табл. 1). Снимки 3 типа условно разделяются на два вида, в первом случае облачность приурочена к хребтам и в большей степени мешает дешифрированию лавиносборов, во втором облачность заполняет долину и скрывает тело ледника и лавинные отложения на нём.

Процесс дешифрирования включал три этапа: определение границ ледника, выявление лавиносборов, дешифрирование лавинных отложений.

Дешифрирование границ ледника. Основным фактором, препятствующим корректному определению границ ледника, является снежный покров, поэтому лучше всего границы читаются в короткий теплый период [Виноградов и др., 1966]. Судя по имеющимся данным, как правило, сезонный снежный покров сходит на нет в июле и устанавливается в октябре. Поэтому для дешифрирования границ ледника лучше всего подходят снимки, полученные в период с июля по сентябрь.

Для большей части ледника Безенги граница легко определяется на снимке по переходу от белой или голубой поверхностью льда к тёмным поверхностям участков открытого грунта и скал, однако существует ряд факторов, осложняющих дешифрирование. Серьёзно затрудняют дешифрирование боковые морены. В случаях, когда границы ледника замаскированы мореной, то боковые морены включаются в границы ледника, если непосредственно соприкасаются со льдом [Виноградов, 1966]. Зачастую визуально отделить боковую морену от пород, слагающих ледниковую долину, можно по насыщенности цвета. Низкое альbedo моренных отложений на поверхности ледника приводит к таянию льда и увлажнению морены, поэтому морены в пределах ледника выглядят темнее относительно прилегающих участков.

Дешифрирование границ ледника, главным образом, проводилось визуально по снимкам за 3 сентября 2015 года и 22 сентября 2018 года, так как они характеризуются наименьшим количеством снега на исследуемой территории. Во многих случаях вариант синтеза "средний инфракрасный - ближний инфракрасный - синий" оказался наиболее эффективен. В местах перекрытия границы ледника небольшим поверхностным чехлом боковой морены данный вид синтеза (благодаря наличию среднего инфракрасного канала) позволяет определять границу наиболее уверенно.

Помимо морен, препятствием к точному определению ледниковых границ являются лавинные отложения, которые занимают как поверхности ледника, так и частично склоны. В данном случае целесообразно по форме конусов лавинных отложений и по их структуре отследить перегибы от наклонных поверхностей склонов к субгоризонтальной поверхности ледника.

Отдельно стоял вопрос о дешифрировании границы ледника в зоне его питания, а именно на Безенгийской стене. Стена представляет собой скальный массив с уклонами порядка 30-40°, покрытый ледово-фирновой облицовкой. В связи со сложностями определения сплошности распространения такой облицовки вверх по склону, зачастую граница ледника здесь проводится по водоразделу хребта, и вся поверхность склона включается в границы ледника. В данной работе решено проверить возможности снимков со спутников Sentinel-2 для определения границы единого ледово-фирнового массива, что помогло бы уточнить расчеты лавинной доли питания ледника. В первую очередь по снимкам выделялись обнаженные скальные выступы в пределах Безенгийской стены, затем снизу вверх по склону дешифрировались трещины, отделяющие основной массив ледника от несвязанных с ним снежников на стене выше по склону. В качестве основных дешифровочных признаков таких трещин использовались тени, возникающие в силу большого уклона и северной экспозиции данного склона, и наличие оранжевого цвета при использовании синтеза "средний инфракрасный - ближний инфракрасный - синий", свидетельствующего о видимости подстилающих скальных пород.

Дешифрирование лавиносборов. Следующим этапом работы стало выделение по снимкам на исследуемой территории лавиносборов – участков склонов и дна долины, на которых образуются, движутся и останавливаются снежные лавины. Особенностью территории и используемых данных является то, что основные зоны потенциального возникновения лавин, которые расположены на Безенгийской стене, примерно треть года скрыты в тени. Несмотря на возможность в той или иной мере компенсировать влияние теней и восстановить дешифрируемость снимков, удобнее в использовании всё же снимки, на которых этот участок освещён. Поэтому для дешифрирования границ лавиносборов использовались снимки, полученные с марта по сентябрь. Удобство использования снимков за эти месяцы также обуславливается

тем, что основным признаком, по которому по космическим снимкам выявляются лавиносборы, является наличие лавинных отложений.

Выявление лавиносборов выполнено двумя дополняющими друг друга способами – выявление элементов рельефа (талъвегов и водоразделов), формирующих лавиносборы, и анализ структуры конусов выноса лавинных отложений.

Основная часть лавиносборов территории приурочена к Безенгийской стене. Выявление лавиносборов в рельефе на Безенгийской стене производилось по выступам скальных пород, как правило, обнажённых из под ледово-фирновой облицовки.

Так как некоторые лавиносборы включают склоны, покрытые льдом, то направление течения льда, маркируемое трещинами, также зачастую использовалось при проведении границ. В первую очередь границы проводились по перегибам рельефа в пределах участков с обнажёнными скалами, затем на участках, покрытых снегом и льдом, – по косвенным признакам (направление течения льда, тени, свидетельствующие о перегибах рельефа).

Лавиносборы исследуемой территории, не приуроченные к Безенгийской стене, характеризуются меньшими абсолютными высотами либо приурочены к склонам с экспозицией, отличной от северной, поэтому данные территории не имеют летом устойчивого снежного покрова. В рельефе такие лавиносборы выделялись по талъвегам и выраженным перегибам рельефа. Талъвеги маркируются более светлым цветом грунта, а перегибы рельефа в варианте синтеза "ближний инфракрасный - красный - зелёный" выделяются красным цветом из-за наличия растительности.

В качестве дополнительного материала для выявления лавиносборов использована цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная по данным спутника ALOS. Из-за не слишком высокого пространственного разрешения ЦМР (30 метров) в ряде случаев космические снимки со спутников Sentinel-2 имеют преимущество и могут быть использованы для выявления границ гораздо меньших лавиносборов и в условиях сильно расчленённого рельефа, характерного для Безенгийской стены.

Дешифрирование лавинных отложений. Основным дешифровочным признаком лавинных отложений на леднике летом является цвет. Лавинные отложения заметно светлее ледника, это связано с многочисленными скальными обломками, покрывающими поверхность ледника. Часто цвет лавины заметно меняется от коричневого по таящим краям лавины до белого в её центре, где отложения самые холодные. Помимо цвета, на летних снимках лавины выделяются по отличной от поверхности ледника структуре. Лавинные отложения имеют струйчатую структуру, которая наследует характерную форму конусов выноса лавин, тогда как поверхность ледника покрыта многочисленными трещинами.

При дешифрировании снимков, полученных в зимний сезон, основным дешифровочным признаком лавинных отложений являются их структура и текстура. Важно отметить, что пространственное разрешение

снимков, полученных спутниками Sentinel-2, позволяет дешифровать лавинные отложения на снежном покрове. Это можно делать по следам видимых подвижек снега на общем фоне ненарушенного снежного покрова.

Помимо этого, лавинные отложения характеризуются белым цветом без синего отлива, который приобретает ненарушенный снежный покров в результате подтаивания и перекристаллизации. При синтезе "средний инфракрасный - ближний инфракрасный - синий" отложения могут выделяться по их более бирюзовому оттенку по сравнению с голубым цветом снежного покрова.

*Выводы.* В ходе работы дана оценка пригодности использования снимков со спутников Sentinel-2 в исследованиях лавинного питания долинных ледников Кавказа, а также выявлены возможности и ограничения применения этих снимков для дешифрирования лавинных отложений в пределах ледников.

Высокое пространственное разрешение снимков является их основным достоинством. Его достаточно для дешифрирования лавинных отложений даже в условиях сплошного снежного покрова зимой, так как на снимках хорошо передаются их структура и текстура. Изменения структуры и текстуры снежного покрова читается довольно уверенно, что позволяет получать достоверные данные о площадях лавинных отложений и границах ледника, что важно при оценке лавинного питания.

К другим достоинствам рассматриваемых снимков следует отнести спектральное разрешение съёмочной системы. Полученные на основе имеющихся каналов варианты синтеза позволяют извлекать из снимков больше информации, чем при использовании стандартных каналов оптического диапазона.

Как показал первичный анализ снимков, даже такая высокая повторяемость съёмки, как у Sentinel-2 (раз в 5 дней), может обеспечивать относительно небольшое количество пригодных для дешифрирования снимков. Около 2/3 снимков не пригодны для дешифрирования из-за облачности, что не позволяет вести своевременный мониторинг схождения лавин, а также отслеживать динамику лавинной активности в течение небольших временных отрезков и оценивать повторяемость схода лавин.

К недостаткам использования данных снимков в исследованиях лавинного питания ледников относится не вполне удачное время пролёта спутника над территорией. Затенённость, сохраняющаяся на протяжении почти полугода, снижает качество исходных данных и уменьшает удобство их использования.

Обобщая, можно сказать, что снимки со спутников Sentinel-2 хорошо подходят для дешифрирования границ ледника, удовлетворительно подходят для определения границ лавиносборов (и требуют использования дополнительных материалов) и в разной степени (в зависимости от сезона) пригодны для дешифрирования лавинных отложений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00715 А.

*Список использованных источников*

1. Акифьева К.В. Методическое пособие по дешифрированию аэрофотоснимков при изучении лавин. Л.: Гидрометиздат. 1980. 50 с.
2. Виноградов О.Н., Кренке А.Н., Огановский П.Н. Руководство по составлению каталога ледников СССР. Л.: Гидрометиздат. 1966. 154с.
3. Лосев К.С. Роль лавин в бюджете массы ледников // Тр. ЗакНИГМИ. 1966. Вып. 20. С. 178–182.
4. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 432 с.
5. Eckerstorfer M., Buhler Y., Frauenfelder R., Malnes E. Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential and limitations // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 121. P. 126-140.
6. Eckerstorfer M., Malnes E., Muller K. A complete snow avalanche activity record from a Norwegian forecasting region using Sentinel-1 satellite-radar data // Cold Regions Science and Technology. 2017. V. 144. P. 39-51.

*References*

1. Akifyeva K.V. Methodological manual on the interpretation of aerial photographs in the study of avalanches (Metodicheskoye posobiye po deshifirovaniyu aerofotosnimkov pri izuchenii lavin). Leningrad. Gidrometizdat. 1980. 50 p. (in Russian).
2. Vinogradov O.N., Krenke A.N., Oganovsky P.N. Guide to compiling a catalog of USSR glaciers (Rukovodstvo po sostavleniyu kataloga lednikov SSSR). Leningrad. Gidrometizdat. 1966. 154 p. (in Russian).
3. Losev K.S. The role of the avalanches in the mass glacier budget (Rol' lavin v byudzhete massy lednikov). Trudy ZakNIGMI. 1966. Vol. 20. P. 178-182 (in Russian).
4. Panov V.D. Evolution of the Caucasus modern glaciation. Saint Petersburg. Gidrometizdat. 1993. 432 p. (in Russian).
5. Eckerstorfer M., Buhler Y., Frauenfelder R., Malnes E. Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential and limitations // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 121. P. 126-140.
6. Eckerstorfer M., Malnes E., Muller K. A complete snow avalanche activity record from a Norwegian forecasting region using Sentinel-1 satellite-radar data // Cold Regions Science and Technology. 2017. V. 144. P. 39-51.