

Турчанинова А.С.¹, Марченко Е.С.², Лазарев А.В.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, научно-исследовательская лаборатория снежных лавин и селей, г. Москва, alla_wave87@mail.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕЖНЫХ ЛАВИН В МАЛОИССЛЕДОВАННЫХ РАЙОНАХ

В связи с разнообразием форм и типов движения снежных лавин были разработаны различные способы их моделирования с целью определения основных динамических характеристик лавин и прогнозирования общего характера их перемещения по склону. Основными расчетными характеристиками снежных лавин являются объем и дальность выброса, высота, ширина и скорость лавинного потока, давление лавинного потока о препятствие. Начиная с 30-х гг. XX в., было опубликовано немалое количество работ [3, 12 и др.], посвященных вопросам моделирования снежных лавин и расчету их динамических характеристик. Несмотря на разнообразие моделей движения снежных лавин, применение их в новых малоисследованных районах далеко не всегда представляется возможным. До сих пор, при выполнении снеголавинных расчетов возникает сложный вопрос выбора моделей движения снежных лавин, которые наиболее эффективно использовать в том или ином горном районе. При проведении инженерных изысканий нередко приходится перерабатывать огромный теоретический материал, чтобы выполнить снеголавинные расчеты и обосновать полученные результаты. Предложенные формулы далеко не всегда доведены до уровня приемлемых инженерных расчетов. Это, несомненно, негативно сказывается на результатах. При выполнении расчетов различными организациями, даже при использовании одинаковых методов, результаты могут отличаться в несколько раз.

Динамика снежных лавин определяется всей совокупностью постоянных и переменных факторов лавинообразования. Каждой горной области присущи свои особенности сочетания лавинообразующих факторов и, следовательно, характерные значения динамических характеристик снежных лавин [4]. Рельеф является одним из важнейших постоянных факторов лавинообразования. Он влияет на форму, размеры и распределение в пространстве зон зарождения снежных лавин, определяет объем, мощность и силу их удара, скорость движения, дальность выброса, частоту схода. При моделировании снежных лавин, независимо от используемой модели, в качестве основного источника данных о рельефе в настоящее время используют цифровые модели рельефа (ЦМР) высокого разрешения [8, 14]. Ведущими климатическими факторами лавинообразования, определяющими характер перемещения снежных лавин по склону, служат толщина, температура и тип снега, строение снежной толщи и др. В настоящее время при проведении расчетов динамических характеристик снежных лавин, как правило, применяются модели и расчетные методы, которые не учитывают температурный режим и строение снежной толщи,

образовавшей лавину, а также распределение высоты снега в зоне зарождения и на пути ее движения, а учитывают лишь осредненную толщину оторвавшегося пласта снега. Получение необходимых и достоверных снежно-метеорологических данных является большой проблемой при проведении снеголавинных расчетов. Решение этой проблемы может быть связано с установкой автоматических метеостанций в пригребеневых участках долин, в непосредственной близости к зонам зарождения снежных лавин.

В настоящее время в разных странах разрабатывается специальное, удобное в использовании, программное обеспечение (AVAL-1D; RAMMS; ELBA; SAMOS и др.), которое позволяет моделировать движение снежных лавин и рассчитывать их основные динамические характеристики. Одной из наиболее востребованных на практике программ моделирования снежных лавин в настоящее время является программа RAMMS [6, 9, 10], разработанная в Швейцарии. В основе RAMMS лежит двумерная модель, позволяющая моделировать движение лавин в условиях трехмерного рельефа, созданная на основе гидравлической модели [12, 13] и ряда других разработок. В отличие от одномерных моделей заложенная в программу RAMMS двумерная модель позволяет моделировать образование лавин с разной площадью и высотой обрушающегося пласта снега. Входные параметры модели RAMMS: ЦМР; граница зоны зарождения лавины и толщина отрыва снежного пласта в ней; коэффициенты трения [9]. Модель RAMMS была откалибрована по данным многолетних наблюдений за лавинами в Швейцарии [9, 10]. В России верификация программы RAMMS выполнена по данным детальных многолетних наблюдений за лавинами на Кавказе и в Хибинах [6], что делает возможным ее использование в рассматриваемых горных районах. В других горных районах России и бывшего СССР применение программы RAMMS требует проверки получаемых результатов на независимом материале.

В рамках настоящей работы в научных целях выполнено моделирование снежных лавин с использованием программы RAMMS на Центральном Тянь-Шане. Несмотря на то, что наблюдения за лавинами в рассматриваемом районе проводятся, они, как правило, не охватывают труднодоступные ледниковые районы, где лавины не представляют большой опасности для людей. Тем не менее, лавины там могут служить дополнительным источником питания ледников, чутко реагирующих на климатические изменения и представляющих собой резервуары пресной воды. Поведение ледников неизбежно отражается на всех сторонах хозяйственной деятельности человека в Средней Азии.

Для анализа рельефа, как фактора лавинообразования, и его морфометрических характеристик, влияющих на динамику снежных лавин, были проанализированы доступные в открытом доступе глобальные (SRTM, Aster GDEM, ALOS World 3D) и региональные (High Mountain Asia DEM) ЦМР и цифровые модели местности (ЦММ), созданные по данным ДЗЗ. Проанализирована возможность использования данных аэрофотосъемки, получаемых с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), для составления ЦМР поверхностей ледников и прилегающих к ним лавиноактивных склонов в

высокогорных районах. Установлено, что данные с БПЛА могут быть использованы в качестве источника данных для получения ЦМР высокого разрешения и последующего моделирования снежных лавин. Использование глобальных ЦМР, доступных в открытом доступе, для решения поставленных задач возможно, но пока их разрешение не позволяет моделировать лавины с требуемой точностью. Использование региональных ЦМР представляется перспективным для моделирования снежных лавин в малоисследованных горных районах, так как их разрешение позволяет моделировать снежные лавины с удовлетворительной точностью. К сожалению, пока региональные ЦМР не отличаются сплошным покрытием и содержат большое количество артефактов, что в большинстве случаев затрудняет их использование на практике.

В основе выделения зон зарождения лавин в малоисследованных районах должен лежать анализ данных о рельефе (ЦМР), а также разновременных ДДЗЗ. В нашей стране А.Ю. Соловьевым [5] была предложена математическая модель автоматизированного выделения структурных линий рельефа, основанная на численном интегрировании дифференциальных уравнений кривизны с последующим выделением точек локального экстремума. В Швейцарии разрабатываются специальные программные средства для автоматизированного выделения зон зарождения лавин, основанные на анализе ЦМР в среде ГИС [11 и др.]. Предложенные методики являются перспективными для использования в малоисследованных горных районах. Тем не менее, на практике, исследователи, как правило, до сих пор опираются только на собственный опыт, что приводит к субъективности получаемых результатов.

В основу выделения зон зарождения лавин разной повторяемости на Тянь-Шане в настоящей работе была положена двумерная матрица повторяемости схода лавин в зоне их формирования в зависимости от экспозиции и крутизны склона [7], составленная по данным фактических наблюдений за лавинами в рассматриваемом районе. На основе матрицы разработан скрипт на языке программирования Python, позволяющий на основе анализа ЦМР в автоматическом режиме (в ArcGIS) выделять зоны зарождения лавин разной повторяемости на склонах, где никогда не проводились фактические наблюдения за лавинами. Получаемая информация использовалась в качестве исходных данных для моделирования снежных лавин разной повторяемости в программе RAMMS.

Данных метеорологических наблюдений не хватает для проведения достоверных снеголавинных расчетов и моделирования лавин по причине редкой сети размещения действующих метеостанций в горных районах России и бывшего СССР. В большинстве случаев доступные данные являются нерепрезентативными, так как станции расположены на дне долин или в предгорьях. Это характерно и для большинства хорошо освоенных и исследованных в отношении лавин горных районов нашей страны (к примеру, Кавказа). Поэтому, как правило, нет возможности судить о снежно-метеорологических условиях в зонах зарождения снежных лавин, которые

находятся в пригребневой части долин. В данном случае, к сожалению, пока нет универсальных и надежных решений. Исследователю приходится опираться на данные ближайших удаленных метеостанций, а также региональные зависимости [к примеру, 1], полученные для районов исследования и их аналогов, что и было сделано в настоящей работе. Доля толщины снежного покрова, участвующего в лавинообразовании, определялась в настоящей работе в зависимости от общей толщины снежного покрова на склоне [2].

Коэффициенты трения (μ (-); ζ (м/с²)), используемые при моделировании лавин в RAMMS, зависят от целого ряда показателей (объема лавины, периода повторяемости, абсолютной высоты над уровнем моря, морфологии лавиносбора) [9]. При моделировании снежных лавин в районах, где нет возможности проведения верификации программы RAMMS в связи с отсутствием данных фактических наблюдений за лавинами или доступа к ним, выбор коэффициентов трения может быть основан на данных, полученных в районах аналогов. Моделирование снежных лавин на Тянь-Шане на данном этапе работы выполнено с использованием тех же значений коэффициентов трения, что и в Швейцарии.

Результаты моделирования снежных лавин с использованием программы RAMMS на Тянь-Шане показали удовлетворительный результат. Смоделированные в RAMMS границы лавин в рассмотренные зимние периоды, в целом, соответствуют границам лавинных отложений, восстановленным по данным полевых наблюдений и на основе анализа разновременных данных дистанционного зондирования Земли.

Таким образом, применение двумерной модели движения снежных лавин RAMMS впервые позволило реконструировать в крупном масштабе поля лавинной аккумуляции на трех ледниках Тянь-Шаня (Западный Суек, Кара-Баткак, Ледник № 354) без проведения традиционных детальных снегомерных съемок. Установлено, что программа RAMMS с успехом может применяться для моделирования снежных лавин и оценки доли перенесенного ими снега на их поверхность ледников. Программа RAMMS также может быть рекомендована для использования на практике для проведения инженерных гидрометеорологических изысканий в рассматриваемом районе.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-35-00419\18 «Исследование вклада снежных лавин в питание ледников при недостатке данных прямых наблюдений».

Список литературы

1. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, в 2-х томах. М.: РАН, 1997.
2. Благовещенский В.П. Определение лавинных нагрузок. Алма-Ата: Гылым, 1991. 115 с.

3. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. Л.: ГИМИЗ, 1987. 280 с.
4. Лосев К.С. Основы учения о генезисе лавин и его применение для решения прикладных задач лавиноведения: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М., 1982. 44 с.
5. Соловьев А.Ю. Геоинформационные методы исследования лавинной опасности на примере Хибинского горного массива: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М., 2002. 21 с.
6. Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г. Моделирование снежных лавин в программе RAMMS в России // Геориск. 2015. № 4. С. 42–47.
7. Харитонов Г.Г. Методика расчета лавинного питания ледника // МГИ. 1979. Вып. 36. С. 155–159.
8. Цифровая модель рельефа как основа для исследования снежных лавин / А.С. Седова, Ю.Г. Селиверстов, В.А. Тумасьева, Е.С. Клименко, Е.А. Воронина // Лед и Снег. 2010. № 2 (110). С. 43–50.
9. A numerical model for snow avalanches in research and practice: RAMMS User Manual v. 1.7.0 Avalanche / P. Bartelt, Y. Bühler, M. Christen, Y. Deubelbeiss, M. Salz, M. Schneider, L. Schumacher. Davos: WSL/SLF, 2017. 97 p.
10. Christen M., Bartelt P., Kowalski J. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 63. № 1–2. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>.
11. Maggioni M. Avalanche release areas and their influence on uncertainty in avalanche hazard mapping: dissertation. Zurich, 2005. 139 p.
12. Pudasaini S.P., Hutter K. Avalanche Dynamics. Dynamics of rapid flows of dense granular avalanches. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2007. 602 p.
13. Salm B. Contribution to avalanche dynamics // International Symposium on Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches, Davos: reports and discussions. Wallingford: IAHS Press, 1966. P. 199–214.
14. Sensitivity of snow avalanche simulations to digital elevation model quality and resolution / Y. Bühler, M. Christen, J. Kowalski, P. Bartelt // Annals of Glaciology. 2011. № 52 (58). P. 72–80.
15. Voellmy A. Über die Zerstorungskraft von Lawinen // Schweizerische Bauzeitung. 1955. Vol. 73. P. 212–285.