

Научная статья

УДК 004.942; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-56-67

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СНЕЖНЫХ ЛАВИН И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СТРОЕНИЯМИ

Калач Андрей Владимирович;

✉ **Соловьев Александр Семенович.**

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия.

Лентяева Татьяна Владимировна.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ **asoloviev58@yandex.ru**

Аннотация. Рассмотрены возможности отечественного и зарубежного специализированного программного обеспечения для моделирования движения снежных лавин и прогнозирования ущерба. Показано, что, несмотря на использование различных математических подходов, популярностью у исследователей пользуются двумерные модели движения, что, очевидно, связано с ограничением вычислительных мощностей. Особо отмечено, что использование трехмерного пространства моделирования лавин должно приводить к более реалистичным результатам, однако для сохранения приемлемого времени расчетов исследователям приходится прибегать к различным приближениям и допущениям, что снижает точность расчетов.

По результатам анализа возможностей специализированного программного обеспечения предложен авторский проблемно-ориентированный комплекс программ для синтеза 3D математической модели динамики снежной лавины, основанный на использовании модифицированного численного метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH), выбор которого обусловлен возможностью анализировать влияние микро- и макрорельефа склона на динамику движения, распределение плотности снега по толщине и ширине потока, формирование сопутствующей ударной волны и, соответственно, рассчитать силовое воздействие в различных точках взаимодействия.

Комплекс программ предусматривает возможность варьирования параметров взаимодействия внутри тела лавины, между снежной массой и склоном для моделирования изменения метеорологических условий, а, следовательно, физические свойства снега, что позволяет точнее прогнозировать разрушительное воздействие лавин на элементы инфраструктуры. Адекватность работы оригинального комплекса имитационного моделирования снежных лавин подтверждается сопоставлением результатов компьютерного моделирования с реальными статистическими данными сходов лавин.

Ключевые слова: снежные лавины, модели, программы для ЭВМ, разрушительное воздействие

Для цитирования: Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Современные программные продукты для моделирования динамики снежных лавин и их взаимодействия со строениями // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 56–67. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-56-67

Scientific article

MODERN SOFTWARE PRODUCTS FOR MODELING THE DYNAMICS OF AVALANCHES AND THEIR INTERACTION WITH BUILDINGS**Kalach Andrey V.;****✉ Soloviev Alexander S.****Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia.****Lentyaeva Tatyana V.****MIREA – Russian university of technology, Moscow, Russia****✉ asoloviev58@yandex.ru**

Abstract. The capabilities of domestic and foreign specialized software for modeling snow avalanche motion and predicting damage examined. It shown that, despite the use of various mathematical approaches, two-dimensional motion models are popular among researchers, which is obviously due to limited computing power. It articularly noted that the use of a three-dimensional avalanche modeling space should lead to results that are more realistic; however, to maintain acceptable computation time, researchers must resort to various approximations and assumptions, which reduces the accuracy of calculations.

Based on the analysis of specialized software capabilities, a proprietary problem-oriented software suite for synthesizing a 3D mathematical model of snow avalanche dynamics proposed. This suite based on a modified numerical method of smoothed particle hydrodynamics (SPH). This method is chosen due to its ability to analyze the influence of slope micro- and macrotopography on the dynamics of motion, the distribution of snow density across the thickness and width of the flow, the formation of an accompanying shock wave, and, accordingly, to calculate the force impact at various points of interaction. The software suite allows for varying the interaction parameters within the avalanche body, between the snow mass and the slope, to simulate changes in meteorological conditions and, consequently, the physical properties of the snow, enabling more accurate predictions of the destructive impact of avalanches on infrastructure elements.

The adequacy of the original avalanche simulation suite confirmed by comparing the results of the computer simulation with actual avalanche statistics.

Keywords: avalanches, models, computer programs, destructive effects

For citation: Kalach A.V., Soloviev A.S., Lentyaeva T.V. Modern software products for modeling the dynamics of avalanches and their interaction with buildings // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 56–67. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-56-67

Введение

Снежные лавины являются одним из наиболее опасных природных процессов в горных районах, ежегодно приводящим к человеческим жертвам, разрушению инфраструктуры, повреждению транспортных коммуникаций и значительным экономическим потерям. Масштабы угрозы лавинной активности особенно велики в России, где к наиболее лавиноопасным регионам относятся Кавказ, Урал и Хибинны [1–3]. Высокая повторяемость сходов, сложные природные условия и активное развитие туристической и промышленной инфраструктуры на этих территориях требуют постоянного мониторинга и надёжных методов оценки риска. Существенную роль в оценке лавинной опасности играют численные модели и специализированные программные комплексы, позволяющие воспроизводить динамику снежных масс и прогнозировать их взаимодействие с рельефом и инженерными сооружениями.

В последние десятилетия развитие вычислительных технологий и методов численного моделирования привело к созданию целого ряда специализированных программных решений

для обеспечения эффективного прогнозирования, анализа лавинных процессов и повышения эффективности мер по снижению риска лавинной опасности. Эти системы отличаются математическим аппаратом и функциональными возможностями, а также особенностями адаптации под конкретные природные условия регионов, где они применяются.

Разнообразие реализованных математических моделей и прикладных функций привело к разработке целого спектра программных продуктов поддержки моделирования лавинных процессов как в зарубежной, так и в отечественной практике.

При этом при оценке возможностей таких программных комплексов важно учитывать, какие именно характеристики позволяют считать их полноценным инструментом для описания лавинных процессов, а какие остаются ограничениями. В данном аспекте особое значение при анализе программных комплексов имеет поддержка моделирования в трёхмерном пространстве, которая позволяет учитывать распространение лавины не только вдоль склона, но и в поперечном направлении, а также изменения по высоте потока. Такой подход даёт возможность более реалистично воспроизводить фронтальную и вертикальную структуру лавины, что особенно важно при оценке распределённых нагрузок на сооружения. Именно трёхмерные модели должны составлять основу современных программ поддержки лавинных расчётов, поскольку они отражают сложный пространственный характер движения снежных масс значительно лучше, чем классические одномерные и двумерные схемы.

Немаловажное значение имеют и параметры, определяющие реалистичность воспроизведения динамики снежной массы и корректность прогноза воздействия на объекты инфраструктуры, поскольку именно они напрямую связаны с практическими задачами обеспечения безопасности. Для горных районов ключевой является не только оценка вероятности схода лавины, но и прогноз её конкретных характеристик: скорости, давления, дальности выброса, структуры потока. От этих показателей зависит степень угрозы для зданий, транспортных коммуникаций и защитных сооружений. Если программный комплекс не поддерживает учёт пространственной неоднородности потока или распределение нагрузок на препятствия, то результаты оказываются лишь усреднёнными и недостаточными для инженерного проектирования и планирования защитных мероприятий.

Таким образом, функционал, связанный с поддержкой моделирования в трёхмерном пространстве, учётом локальных свойств снежной массы и расчётом распределённых нагрузок, рассматривается как наиболее значимый при анализе программных комплексов для моделирования лавинных процессов, а его отсутствие указывает на ограничения и снижает прикладную ценность программных решений.

Цель исследования – провести сравнительный анализ возможностей современных специализированных программных продуктов для моделирования динамики снежных лавин и их взаимодействия со строениями и по результатам проведенной комплексной оценки разработать программный комплекс для трёхмерного (3D) численного моделирования динамики снежных лавин на основе модифицированного метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH), обеспечивающий реалистичное воспроизведение фронтальной и вертикальной структуры лавины и точную оценку распределённых нагрузок на сооружения.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

Предложен оригинальный подход к моделированию динамики снежных лавин, основанный на объемном (3D) учёте их распространения (вертикальная и поперечная составляющие распространения лавины).

Обеспечен качественный переход от упрощенных моделей к объемным при моделировании динамики снежных лавин, что существенно повышает точность расчета нагрузок и оптимизации защитных противолавинных конструкций для обоснования выбора мероприятий по повышению живучести объектов инфраструктуры.

Разработан оригинальный программный комплекс для трёхмерного (3D) численного моделирования динамики снежных лавин на базе метода гидродинамики сглаженных частиц.

Модели и методы исследования

При моделировании движения снежной лавины особое внимание уделяется учёту сложного горного рельефа и интеграции моделей с геоинформационными системами для оперативного прогнозирования и защиты транспортных коридоров.

Среди наиболее востребованных зарубежных разработок можно выделить систему AVAL-1D (One-dimensional numerical dense and powder snow avalanche dynamic model), разработанную в Швейцарском институте снеголавинных исследований (SLF, Давос) и представленную в 2000 г. Система была создана как дополнение к классической модели Вельми–Зальма [4] и ориентирована на практическое применение при прогнозировании лавинной опасности [5].

Программа включает два основных вычислительных модуля: FL-1D для мокрых лавин и SL-1D для сухих пылевых лавин. Первый представляет собой квазиодномерную гидравлическую модель, усредненную по глубине. Второй описывает движение двухслойной лавины – плотного нижнего и пылевого верхнего слоя.

Программа позволяет с приемлемой точностью моделировать движение лавины в одномерном пространстве, определять дальность выброса, скорость, силу удара и высоту лавинного потока. Результаты верификации показывают, что модель в целом воспроизводит наблюдаемые параметры движения лавины, однако точность расчётов может меняться в зависимости от типа лавины и характера рельефа [5, 6]. Недостатком AVAL-1D является невозможность моделирования воздействия на сооружения и учет сложного рельефа, что ограничивает ее инженерную применимость.

Дальнейшее развитие швейцарской школы моделирования привело к созданию программы ELBA (Energy Line Based Avalanche) [7]. В отличие от AVAL-1D, она имеет двумерную структуру и позволяет исследовать перераспределение снежной массы по площади.

Применение ELBA ориентировано на определение зон поражения и распределение лавинных отложений. Для удобства визуализации программа интегрирована в среду ArcGIS, что делает её удобной для картографических и инженерных приложений. По результатам испытаний в ряде работ отмечается удовлетворительная точность прогнозирования зон поражения, хотя конкретные значения ошибок зависят от условий рельефа и используемых данных [8, 9]. ELBA, как и AVAL-1D, не рассчитывает смещение и деформацию сооружений, ограничивая свою сферу применения задачами прогнозирования лавинной активности.

Австрийская разработка SAMOS (Snow Avalanche MOdelling and Simulation) появилась в 1999 г. и изначально предназначалась для моделирования сухих лавин [10]. Программа могла работать как в двумерном, так и в трёхмерном режимах. Позднее в 2007 г. появилась усовершенствованная версия SAMOS-AT, которая стала стандартом для инженерных расчетов в Австрии. Главным преимуществом SAMOS-AT стало внедрение двухфазной модели, учитывающей баланс массы и импульса для плотного и пылевого слоя лавины. Дополнительно был интегрирован метод сглаженных частиц (SPH), что позволило учитывать турбулентное взаимодействие снежных масс и повысило точность расчетов. Верификация показала, что программа способна достаточно точно воспроизводить основные динамические характеристики лавины, включая скорость потока, траекторию движения и величину давления [11]. Вместе с тем, как и многие другие модели, SAMOS-AT не рассматривает локальные деформации сооружений, что ограничивает её применение в задачах детального инженерного анализа.

Следует отметить, что по состоянию на сегодня одной из самых востребованных систем является RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation), созданная в Швейцарии¹. В отличие от более ранних моделей, RAMMS учитывает рельеф в трех измерениях и позволяет моделировать широкий спектр процессов: лавины, оползни, селевые потоки. В основе RAMMS лежит двумерная модель, усредненная по глубине, но работающая на цифровых моделях рельефа (ЦМР). Важным преимуществом является возможность калибровки коэффициентов трения по данным наблюдений, что позволяет адаптировать модель под конкретные регионы.

¹ URL: <http://ramms.slf.ch/ramms/> (дата обращения: 12.02.2026)

Система активно применяется не только в Швейцарии, но и в России (Хибины, Приэльбрусье). Проверка расчётов по данным наблюдений показала, что программа обеспечивает высокую точность прогноза скорости потока и дальности выброса, что делает RAMMS одной из наиболее надёжных современных систем [12]. Тем не менее, модель не учитывает угловое смещение зданий, неравномерную нагрузку на конструкции и локальные деформации фасадов. Для наглядности основные характеристики зарубежных программных комплексов сведены в таблицу, где представлены ключевые параметры моделей, а также их особенности и ограничения реализации (таблица).

Таблица

**Ключевые характеристики и ограничения программных продуктов
поддержки лавинных процессов**

Наименование программного продукта	Ключевые характеристики и ограничения
AVAL-1D	Характеристики: одномерная модель лавин (мокрых и сухих); включает модули FL-1D и SL-1D; рассчитывает скорость, высоту, давление и дальность выброса. Ограничения: не учитывает сложный рельеф и боковое распространение лавины; давление определяется усреднённо по высоте; нет оценки воздействия на сооружения из-за одномерной упрощённой методологии.
ELBA	Характеристики: двумерная модель лавин; позволяет анализировать перераспределение снежной массы по площади; интегрирована в среду ArcGIS для картографических приложений. Ограничения: ограничена двумерным описанием лавинного процесса; не моделирует смещение и деформацию сооружений; не рассчитывает локальное распределение давления; точность прогноза зависит от качества входных данных
SAMOS-AT	Характеристики: может функционировать как в двумерном (снежная лавина как однородная масса сухого снега), так и в трёхмерном режиме (снежная масса неоднородна); используется метод сложенных частиц (SPH) для учёта турбулентности и коэффициенты жесткости. Ограничения: несмотря на наличие трёхмерного режима, его применение ограничено и требует значительных вычислительных ресурсов; не моделирует локальные деформации и неравномерное давление на сооружения; коэффициенты жёсткости принимаются постоянными
RAMMS	Характеристики: двумерная модель; использует цифровые модели рельефа; применяется для лавин, оползней, селей; поддерживает калибровку коэффициентов по наблюдениям; активно используется в Европе и России. Ограничения: двумерная модель на трёхмерном рельефе (в лавине не моделируется внутреннее распределение плотности, скорости и давления по вертикали); не учитывает угловое смещение и локальные деформации зданий; ограничена в анализе распределённой нагрузки на конструкции

Сравнительный анализ показывает, что каждая из рассмотренных программных систем имеет свои сильные стороны и ограничения, связанные с выбранным математическим аппаратом и областью применения. Также следует отметить, что большинство зарубежных программных комплексов основаны на одномерных или двумерных схемах, в которых вертикальная структура снежного потока описывается усреднённо.

Необходимо отметить, что такой подход позволяет решать задачи прогнозирования дальности выброса и зон поражения, однако имеет ограничения при инженерных расчётах, где требуется учёт локальных нагрузок и детальная пространственная динамика. В связи с этим особый интерес представляют программные решения поддержки моделирования в трёхмерном пространстве, которые позволяют учитывать внутреннюю структуру лавины и её взаимодействие с объектами инфраструктуры более реалистично.

Проблемно-ориентированный комплекс программ трёхмерной модели движения, взаимодействия снежной массы со строениями и анализа результатных данных компьютерной симуляции схода снежной лавины позволяет прогнозировать объём, траекторию движения, разрушительное воздействие снежной лавины на строения в зоне транзита лавины, а также анализировать полученные данные [13–15].

Математическая основа программного комплекса опирается на модифицированный метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH). В отличие от стандартной реализации метода сглаженных частиц (SPH), используемой, например, в комплексе SAMOS-AT, в предлагаемом подходе реализован ряд модификаций, направленных на повышение устойчивости вычислений и адаптацию модели к физическим свойствам снежной массы.

В вычислительных экспериментах классическая функция сглаживания $W(q, h)$ нами была заменена на гиперболическую, которая обладает положительными производными второго порядка, что обеспечивало плавное изменение градиента ядра. В результате такой модификации, при сближении частиц возникает корректная сила отталкивания, предотвращающая их нефизическое «слипание», а при увеличении расстояния отсутствуют резкие скачки сил. Таким образом, модификация ядра сглаживания повысила устойчивость расчёта и обеспечила реалистичное воспроизведение структуры снежного потока. Кроме того, в модели реализован адаптивный механизм задания параметров взаимодействия частиц на основе локальной плотности снежной массы. Плотность каждой частицы вычисляется по классической формуле SPH как взвешенная сумма масс соседних частиц с использованием функции сглаживания. При этом плотность не интерполируется напрямую, а определяется как результат суммирования вкладов соседних частиц, что отражает локальные процессы уплотнения и разрежения снежной массы.

Полученное значение плотности используется как промежуточный параметр для классификации состояния снега (рыхлый, влажный, плотный). В зависимости от диапазона плотности автоматически выбираются безразмерные коэффициенты упруго-вязкого взаимодействия частиц. Такой подход позволяет учитывать изменение механических свойств снежной массы в процессе движения лавины без введения сложных реологических зависимостей и обеспечивает адаптацию модели к различным типам снега.

В отличие от ряда существующих решений, таких как SAMOS-AT и RAMMS [12, 16, 17], где коэффициенты взаимодействия и трения, как правило, задаются постоянными или подбираются на этапе калибровки и не изменяются в ходе расчёта, в предложенной модели реализовано их динамическое изменение. Это позволяет более корректно описывать переходы между различными режимами поведения снежной массы, включая разрыхление, уплотнение и формирование ударных фронтов.

Таким образом, предложенная модификация метода SPH отличается использованием гиперболической функции сглаживания с устойчивыми производными, адаптивным определением параметров взаимодействия частиц на основе локальной плотности и динамическим изменением коэффициентов модели в процессе расчёта.

На основе описанной модификации метода SPH формируется дискретное представление снежной массы в виде системы взаимодействующих снежных частиц.

В рамках предложенного оригинального подхода снежная масса представляется совокупностью одинаковых шарообразных частиц фиксированного диаметра d_c . Каждая частица характеризуется набором переменных, позволяющих однозначно задать её положение и движение в пространстве. Для этого используется: три координаты центра частицы (x_i, y_i, z_i) и три проекции вектора скорости частицы (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}).

Координаты центра определяют текущее положение частицы в трёхмерной области моделирования. Их отслеживание необходимо для того, чтобы воспроизводить траекторию движения лавины, фиксировать взаимодействие с поверхностью склона и строениями, а также вычислять распределение снежной массы в пространстве.

Проекции скорости показывают, с какой интенсивностью частица перемещается по каждой из координатных осей. Это позволяет рассчитать направление и величину движения, определить ускорение, ударные нагрузки. Отслеживание скоростей по трём осям необходимо для того, чтобы воспроизводить динамическое развитие лавины: ускорение на крутых участках склона, замедление при встрече с препятствиями, расслоение потока и образование ударных фронтов.

Взаимодействие элементов снега друг с другом и с поверхностью склона описывается вязкоупругой моделью. Такой подход позволяет учесть основные механические свойства снежной массы: плотность, коэффициенты трения со склоном и между элементами, а также жёсткость контактов между частицами и поверхностью горного склона [14].

Необходимо отметить, что гиперболическая функция имеет положительные производные второго порядка, что означает, что при сближении частиц возникает сила отталкивания, предотвращающая нереалистичное «слипание» частиц, а при увеличении расстояния не создаётся резких скачков сил.

Результаты исследования и их обсуждение

Приведенные особенности модели были положены в основу программного комплекса, позволяющего анализировать поведение снежной массы на горном склоне и прогнозировать объем лавины, траекторию движения и характер разрушительного воздействия на инфраструктурные объекты. В ходе компьютерного эксперимента имитируется образование лавины из заданного объема снежной массы. Пользователь задаёт начальные параметры: количество частиц, диаметр частицы, массу частицы, параметры сооружения (рис. 1).

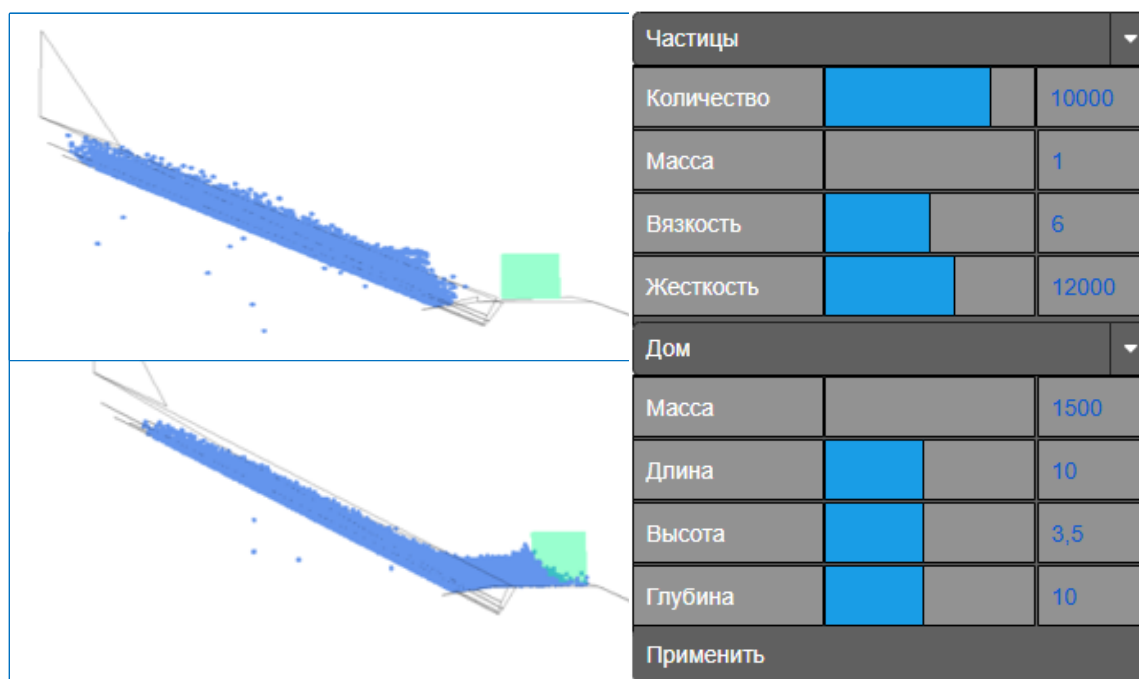


Рис. 1. Визуализация динамики снежной лавины и ее столкновения со строениями

На начальном этапе частицы случайным образом распределяются в заданной геометрической форме, расположенной в верхней части области моделирования. В процессе интегрирования уравнений движения снежная масса оседает на поверхность, формирует неподвижный слой, а затем начинает двигаться вниз по склону с ускорением. По мере движения меняется положение снежной массы во времени t , и на определённом этапе происходит столкновение со строением.

В ходе численного эксперимента характер взаимодействия лавины с объектом зависит от величины действующих сил. Если результирующее давление превышает силу статического трения между основанием здания и поверхностью склона, сооружение срывается с места и начинает перемещаться поступательно, что выражается в изменении его координат. В тех случаях, когда статическое трение удерживает объект, но переданный лавиной момент импульса оказывается достаточным, возможны вращение или опрокидывание строения [14].

Функционально программа позволяет структурировать полученные в ходе расчета динамических характеристик снежной массы параметры, например, скорость элементов, координаты в трехмерном пространстве, и отображать их в необходимом для пользователя виде [15].

Кроме того, программная реализация позволяет получать количественные данные о распределении нагрузок. В частности, расчёт давления на строения даёт возможность выявить не только суммарное воздействие потока, но и его распределение по высоте и ширине конструкции (рис. 2).

Такой подход обеспечивает более точную оценку характера разрушений и служит основой для проектирования защитных мер.

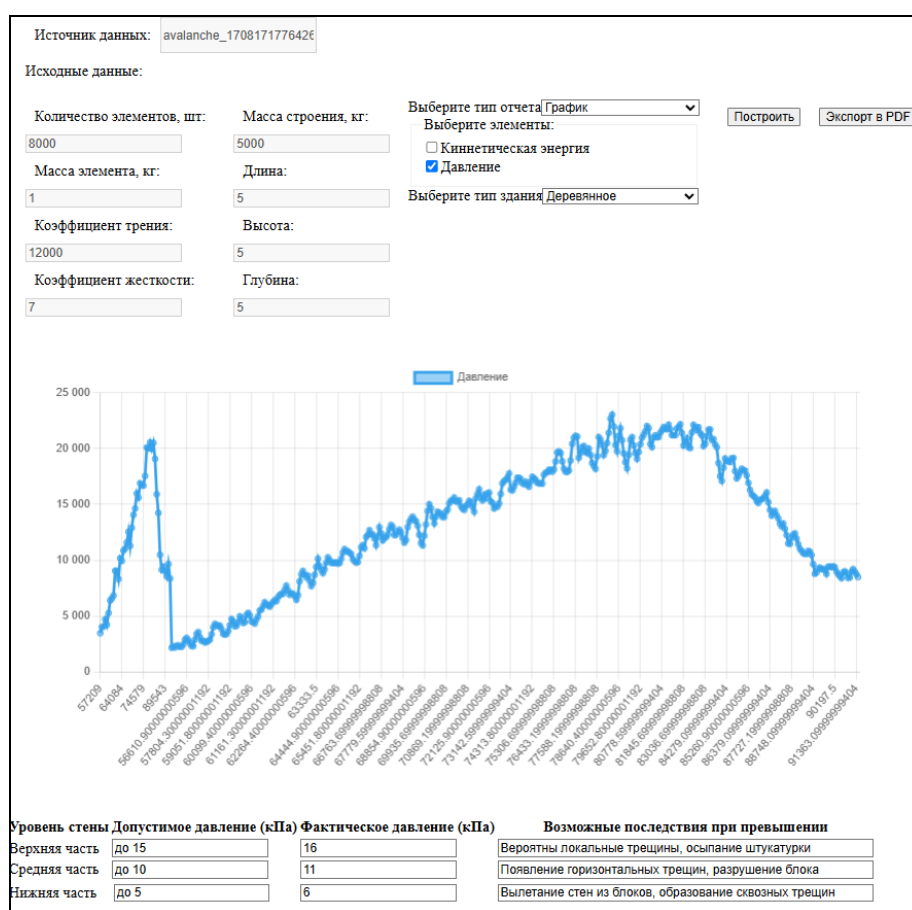


Рис. 2. Визуализация анализа результатных данных схода снежной лавины и ее столкновения со строениями

Для подтверждения адекватности разработанной модели выполнена её количественная верификация на основе сопоставления результатов численного моделирования с реальными статистическими данными сходов лавин в районе г. Норильска. В рамках компьютерного эксперимента воспроизводили взаимодействие снежной массы с группой зданий, для которых по фото- и видеоматериалам была восстановлена карта смещений и поворотов сооружений.

Модель позволила получить временные зависимости давления и кинетической энергии снежной массы, а также определить итоговое положение зданий после воздействия лавины.

Сравнительный анализ показал, что рассчитанные значения смещений хорошо согласуются с натурными данными: средняя относительная погрешность определения перемещений зданий составила порядка 6–8 % (по метрике MAPE), при этом абсолютная ошибка не превышала 1,0–1,5 м. Полученные результаты свидетельствуют о корректности воспроизведения динамики взаимодействия лавины со строениями [19].

Дополнительно установлено, что точность определения смещений в разработанной модели в 2–3 раза выше по сравнению с типовыми двумерными решениями, реализованными в таких программных комплексах, как SAMOS-AT и RAMMS, для которых характерна погрешность порядка 10–25 % при оценке аналогичных параметров [19].

Повышение точности обусловлено использованием трёхмерного представления снежной массы и учётом локальных взаимодействий частиц, что позволяет корректно воспроизводить такие эффекты, как неравномерное распределение давления, экранирование зданий и их угловое смещение, не учитываемые в упрощённых моделях.

Заключение

Таким образом, выполнен обзор возможностей современных отечественных и зарубежных программных пакетов для моделирования лавинных потоков. Особо отмечено, что точность определения смещений в разработанной модели в 2–3 раза выше по сравнению с типовыми двумерными решениями, реализованными в SAMOS-AT и RAMMS при оценке аналогичных параметров.

Предложено модифицировать метод сглаженных частиц путем замены классической функции сглаживания $W(q,h)$ на гиперболическую, обладающую положительными производными второго порядка. Установлено, что в результате такой модификации. Таким образом, модификация ядра сглаживания повысила устойчивость расчёта (при сближении частиц возникает корректная сила отталкивания, предотвращающая их нефизическое «слипание», а при увеличении расстояния отсутствуют резкие скачки сил) и обеспечила реалистичное воспроизведение структуры снежного потока.

Показаны возможности совместного применения трёхмерных моделей и метода сглаженных частиц (SPH) для повышения точности воспроизведения динамики снежных лавин и распределения их нагрузок на объекты инфраструктуры. Предложен оригинальный подход к моделированию динамики снежных лавин, в отличие от существующих обеспечивающий качественный переход к объемному (3D) моделированию и учитывающий поперечное и вертикальное распространение лавины, что позволяет повысить точность расчета силовых нагрузок, оптимизировать защитные противолавинные конструкции и обосновать выбор мероприятий по повышению живучести объектов инфраструктуры.

Список источников

1. Кадастр лавинной опасности территории ВТРК «Мамисон» (Северная Осетия – Алания) / А.Х. Аджиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2024. № 3 (223). С. 39–47. DOI: 10.18522/1026-2237-2024-3-39-47
2. Викулина М.А. Лавинная опасность и риск в Хибинах в условиях развития рекреации в начале XXI века // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 3. С. 276–287. DOI 10.34753/HS.2022.4.3.276
3. Гулевич В.П., Манзий Д.Д. Учет снежности при оценке лавинной активности в малоизученных горных районах (на примере Прибайкалья) // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 1 (21). С. 50–63. DOI 10.21285/2500-1582-2021-1-50-63

4. Bartelt P., Salm B., Gruber U. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining // *Journal of Glaciology*. 1999. № 45 (150). P. 242–254.
5. Christen M., Bartelt P., Gruber U. AVAL-1D: an avalanche dynamics program for the practice // *Proceedings of the International Congress «Interpraevent 2002 in the Pacific Rim»*. 2002. Vol. 2. P. 715–725.
6. Bocchiola D., Rosso R. Application of a regional approach for hazard mapping at an avalanche site in northern Italy // *Advances in Geosciences*. 2008. Vol. 14. P. 201–209. DOI: 10.5194/adgeo-14-201-2008
7. Volk G., Kleemayr K. Lawinensimulationsmodell ELBA // *Wildbach- und Lawinenverbau*. 1999. Vol. 138. P. 23–32.
8. Aydın A. Comparing the performance of base map scales in GIS-based avalanche simulation: a case study from Palandöken, Turkey // *Environmental Earth Sciences*. 2010. № 61. P. 1467–1472.
9. Using tree-ring signals and numerical model to identify the snow avalanche tracks in Kastamonu, Turkey / N. Köse [et al.] // *Natural Hazards*. 2010. № 54. P. 435–449.
10. Sailer R., Rammer L., Sampl P. Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2002. № 2. P. 211–216.
11. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // *Annals of Glaciology*. 2004. Vol. 38. P. 393–398.
12. Турчанинова А.С. Определение зон зарождения и оценка динамических характеристик снежных лавин: дис. ... канд. географ. наук. М.: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2013. 175 с.
13. Лентяева Т.В. Программная реализация трехмерной модели динамики снежной массы // *Вестник Воронежского института ФЦИН России*. 2023. № 3. С. 104–111.
14. Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Моделирование движения снежной лавины // *Технологии техносферной безопасности*. 2025. № 1 (107). С. 116–133. DOI: 10.25257/TTS.2025.1.107.116-133
15. Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Модель и алгоритм взаимодействия снежной лавины со строениями // *Технологии техносферной безопасности*. 2024. № 1 (103). С. 152–163. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.152-163
16. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // *Annals of Glaciology*. 2004. Vol. 38. P. 393–398. DOI: 10.3189/172756404781814780
17. Christen M., Bartelt P., Gruber U. Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Vol. 63. № 1–2. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.004
18. Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В. Компьютерное моделирование воздействий снежной лавины на объекты инфраструктуры в условиях чрезвычайной ситуации // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2025. № 1 (73). С. 30–40. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-30-40

References

1. Kadastr lavinnoj opasnosti territorii VTRK «Mamison» (Severnaya Osetiya – Alaniya) / A.H. Adzhiev [i dr.] // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Ser.: Estestvennye nauki*. 2024. № 3 (223). S. 39–47. DOI: 10.18522/1026-2237-2024-3-39-47
2. Vikulina M.A. Lavinnaya opasnost' i risk v Hibirinah v usloviyah razvitiya rekreacii v nachale XXI veka // *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya*. 2022. T. 4. № 3. S. 276–287. DOI: 10.34753/HS.2022.4.3.276

3. Gulevich V.P., Manzij D.D. Uchet snezhnosti pri ocenke lavinnoj aktivnosti v maloizuchennyh gornyh rajonah (na primere Pribajkal'ya) // HKHI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. T. 6. № 1 (21). S. 50–63. DOI 10.21285/2500-1582-2021-1-50-63
4. Bartelt P., Salm B., Gruber U. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining // Journal of Glaciology. 1999. № 45 (150). P. 242–254.
5. Christen M., Bartelt P., Gruber U. AVAL-1D: an avalanche dynamics program for the practice // Proceedings of the International Congress «Interpraevent 2002 in the Pacific Rim». 2002. Vol. 2. P. 715–725.
6. Bocchiola D., Rosso R. Application of a regional approach for hazard mapping at an avalanche site in northern Italy // Advances in Geosciences. 2008. Vol. 14. P. 201–209. DOI: 10.5194/adgeo-14-201-2008
7. Volk G., Kleemayr K. Lawinensimulationsmodell ELBA // Wildbach- und Lawinenverbau. 1999. Vol. 138. P. 23–32.
8. Aydin A. Comparing the performance of base map scales in GIS-based avalanche simulation: a case study from Palandöken, Turkey // Environmental Earth Sciences. 2010. № 61. P. 1467–1472.
9. Using tree-ring signals and numerical model to identify the snow avalanche tracks in Kastamonu, Turkey / N. Köse [et al.] // Natural Hazards. 2010. № 54. P. 435–449.
10. Sailer R., Rammer L., Sampl P. Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2002. № 2. P. 211–216.
11. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // Annals of Glaciology. 2004. Vol. 38. P. 393–398.
12. Turchaninova A.S. Opređenje zon zarozhdeniya i ocenka dinamicheskikh harakteristik snezhnyh lavin: dis. ... kand. geograf. nauk. M.: Mosk. gos. un-t im. M.V. Lomonosova, 2013. 175 s.
13. Lentyaeva T.V. Programmnaya realizaciya trekhmernoj modeli dinamiki snezhnoj massy // Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii. 2023. № 3. S. 104–111.
14. Kalach A.V., Solov'ev A.S., Lentyaeva T.V. Modelirovanie dvizheniya snezhnoj laviny // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2025. № 1 (107). S. 116–133. DOI: 10.25257/TTS.2025.1.107.116-133
15. Kalach A.V., Solov'ev A.S., Lentyaeva T.V. Model' i algoritm vzaimodejstviya snezhnoj laviny so stroeniyami // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2024. № 1 (103). S. 152–163. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.152-163
16. Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS // Annals of Glaciology. 2004. Vol. 38. P. 393–398. DOI: 10.3189/172756404781814780
17. Christen M., Bartelt P., Gruber U. Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 63. № 1–2. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.004
18. Kalach A.V., Solov'ev A.S., Lentyaeva T.V. Komp'yuternoe modelirovanie vozdeystvij snezhnoj laviny na ob'ekty infrastruktury v usloviyah chrezvychajnoj situacii // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 30–40. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-30-40

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.11.2025; одобрена после рецензирования: 03.04.2026;
принята к публикации: 29.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 20.11.2025; approved after review: 03.04.2026;
accepted for publication: 29.04.2026

Информация об авторах:

Калач Андрей Владимирович, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1А); профессор кафедры прикладной математики МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), доктор химических наук, профессор, e-mail: a_kalach@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN-код: 2584-7456

Соловьев Александр Семенович, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1А), доктор технических наук, доцент, e-mail: asoloviev58@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6150-1090>, SPIN-код: 2494-6180

Лентяева Татьяна Владимировна, старший преподаватель МИРЭА – Российского технологического университета (119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78), e-mail: mtv_ef2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6855-8703>, SPIN-код: 7207-1714

Information about the authors:

Kalach Andrey V., head of the department of information security and protection of information constituting a state secret of the Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia (394072, Voronezh, Irkutskaya str., 1A); professor of the department of applied mathematics of MIREA – Russian technological university (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), doctor of chemical sciences, professor, e-mail: a_kalach@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>, SPIN: 2584-7456

Soloviev Alexander S., professor of the department of information security and protection of information constituting a state secret of the Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia (394072, Voronezh, Irkutskaya str., 1A), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: asoloviev58@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6150-1090>, SPIN: 2494-6180

Lentyaeva Tatyana V., senior lecturer of MIREA – Russian technological university (119454, Moscow, Vernadsky ave., 78), e-mail: mtv_ef2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6855-8703>, SPIN: 7207-1714