

УДК 519.876.5:551.578.48

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.018](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.018)

Математическое моделирование и имитационное исследование динамики снежных лавин

А.В. Калач¹, А.С. Соловьев¹, Т.В. Лентяева², В.А. Дурденко¹

¹Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Резюме. Проведен сравнительный анализ существующих методов моделирования снежных лавин – физических, имитационных и численных, основанных на механике сплошных сред. Выявлены их допущения, ограничения и особенности применения, препятствующие точному прогнозированию динамики снежной массы и её взаимодействия с препятствиями в естественных условиях. Показано, что дальнейшее развитие методов прогнозирования лавинной опасности и оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации связано с использованием интеллектуальных информационных систем поддержки принятия решений, которые должны обладать высокой масштабируемостью, способностью к обработке больших объёмов данных, а также гибкой архитектурой, допускающей интеграцию новых модулей моделирования, анализа и визуализации данных. Предложено решать задачу трёхмерного моделирования лавинного потока с использованием гибридного подхода, сочетающего преимущества физических и имитационных моделей, что обеспечивает оперативность вычислений и адаптивность метода к различным условиям формирования лавин. Разработана модель движения снежной массы, в основу которой положен на модифицированный численный метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Особенностью метода является использование безразмерных настраиваемых коэффициентов вместо постоянных физических параметров снега и применение гиперболической функции сглаживания, что повышает устойчивость и точность численного расчёта, предотвращая нефизические скопления частиц при сжатии. Проведённые вычислительные эксперименты подтвердили, что предложенная модель адекватно описывает движение снежных масс, позволяет оценивать интенсивность их взаимодействия с объектами инфраструктуры и прогнозировать потенциальные разрушения в лавиноопасных районах.

Ключевые слова: снежные лавины, математическое моделирование, гидродинамика сглаженных частиц, информационная система, имитационное моделирование.

Для цитирования: Калач А.В., Соловьев А.С., Лентяева Т.В., Дурденко В.А. Математическое моделирование и имитационное исследование динамики снежных лавин. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2055> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.018

Mathematical modeling and simulation study of snow avalanche dynamics

A.V. Kalach¹, A.S. Soloviev¹, T.V. Lentyaeva², V.A. Durdenko¹

¹Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, the Russian Federation

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. A comparative analysis of existing methods for snow avalanche modeling – physical, simulation, and numerical approaches based on continuum mechanics. Their assumptions, limitations, and application features have been identified, which hinder accurate prediction of snow mass dynamics and its interaction with obstacles under natural conditions. It has been shown that the further development of avalanche hazard forecasting and emergency response methods is associated with the

use of intelligent decision-support information systems that should possess high scalability, the ability to process large data volumes, and a flexible architecture that allows integration of new modules for modeling, analysis, and data visualization. To address the problem of three-dimensional avalanche flow modeling, a hybrid approach is proposed that combines the advantages of physical and simulation models, ensuring computational efficiency and adaptability of the method to various avalanche formation conditions. A model of snow mass movement has been developed, based on a modified numerical method of smoothed particle hydrodynamics (SPH). A distinctive feature of the method is the use of dimensionless adjustable coefficients instead of constant physical parameters of snow and the application of a hyperbolic smoothing function, which increases the stability and accuracy of numerical calculations while preventing nonphysical particle clustering during compression. The performed computational experiments confirmed that the proposed model adequately describes the motion of snow masses, makes it possible to assess the intensity of their interaction with infrastructure objects, and allows prediction of potential destructive effects in avalanche-prone areas.

Keywords: snow avalanches, mathematical modeling, hydrodynamics of smoothed particles, information system, simulation.

For citation: Kalach A.V., Soloviev A.S., Lentyaeva T.V., Durdenko V.A. Mathematical modeling and simulation study of snow avalanche dynamics. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=2055> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.018

Введение

Снежные лавины представляют собой природную опасность для жизни, инфраструктуры и экосистемы по всему миру. При этом исследование влияния рельефа, свойств снежного покрова и метеорологических параметров имеют важное значение для прогнозирования и смягчения последствий таких быстроразвивающихся опасных природных явлений как лавины.

Традиционно мониторинг снежных склонов основан на применении полевых систем наблюдения и сбора информации о сходе лавин. Несмотря на возможность получения этими методами высокоточных данных о состоянии снежного склона в режиме реального времени, они не применимы в высокогорных районах со сложными климатическими условиями и крутыми горными склонами. Кроме того, прогнозирование динамики лавин, оценка устойчивости снежного покрова представляет сложную задачу [1, 2].

В настоящее время существует два основных подхода к оценке лавинной опасности – статистический и физический [3]. При статистическом подходе устанавливают детерминированные связи между известными случаями схода лавин и соответствующим им метеорологическими, физико-географическим условиям. Для прогнозирования возникновения лавин широко применяется метод «ближайших соседей», позволяющий оценить метеорологические условия и состояние снежного покрова, аналогичные тем, которые наблюдались в случаях схода лавин в прошлом [4].

Необходимо отметить, что в настоящее время в прогнозировании снеголавинных процессов хорошо зарекомендовали себя методы машинного обучения – «деревья классификации», «случайный лес» и метод опорных векторов [5, 6]. Однако из-за природы «черного ящика» методы машинного обучения характеризуются недостаточной воспроизводимостью результатов в других климатических условиях без полной перенастройки внутренних параметров модели. Кроме того, методы машинного обучения являются детерминированными, в то время как снеголавинные процессы представляют собой стохастическую систему.

В качестве недетерминированного подхода известно применение обобщенной модели Парето для прогнозирования лавин в Альпах [7].

Физические подходы представляют лавиноопасные явления с позиций описания физических процессов зарождения снежного покрова и до формирования самой лавины. Для лавин модели прогнозирования, как правило, опираются на физическую концепцию, связанную с образованием лавины из-за механической нестабильности снежного покрова (зарождение, распространение трещин, разрушение при растяжении).

Согласно этой концепции, нестабильность снежного покрова является основным условием, необходимым для зарождения разрушения снежного покрова, традиционно диагностируемого с помощью естественного индекса устойчивости (SI), определяемого как отношение прочности на сдвиг слоя снега к напряжению сдвига слоев снега. Традиционно считают, что при значениях $SI < 1,5$ возможен сход лавины [8, 9].

Следует отметить, что лавины не всегда происходят при низких SI, поскольку нестабильность снежного покрова является лишь одним из необходимых условий для образования лавин [10]. В связи с этим прогнозирование лавин напрямую с использованием физических подходов в настоящее время является сложной задачей.

Чтобы сократить разрыв между механической нестабильностью снежного покрова и возникновением лавин, физические методы следует интегрировать со статистическими. Viallon-Galinier L. предложил модели случайного леса с использованием предикторов, (например, SI) и их производных по времени, для эффективного моделирования динамики снежного покрова [11].

Mauger S. предложил описывать вероятностный переход снежного покрова в лавины сигмоидными функциями [12].

Однако разработанная модель оказалась непригодной для интерпретации процессов, характеризующих масштабную нестабильность снежного покрова. Обнаружение неустойчивости снежного покрова в режиме реального масштаба времени представляет собой сложную задачу и, в настоящее время, как правило, прогнозирование лавинной опасности ограничивается радиолокационным мониторингом или визуальным наблюдением за известными маршрутами схода снежных лавин.

Таким образом, проведенный анализ основных методов моделирования снежных лавин (физического, имитационного и численного на основе механики сплошных сред) выявил их допущения и существующие ограничения, не позволяющие эффективно прогнозировать динамику снежной массы и комплексное взаимодействие с препятствиями.

Перспективы оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации, вызванные такими быстроразвивающимися опасными природными явлениями как снежные лавины, связаны с применением для поддержки принятия управленческих решений информационных систем, характеризующихся масштабируемостью, существенно превышающей базовый уровень, для обработки больших объемов данных для целостности данных и производительности; гибкой архитектурой, позволяющей интегрировать или изменять новые функции, позволяющие моделировать динамику снежных масс, прогнозировать лавинную опасность и оценивать последствия схода лавины для инфраструктуры.

Целью данного исследования является моделирование снежной лавины с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) и оценка на этой основе разрушительного воздействия лавины на элементы инфраструктуры.

Материалы и методы

Обзор современных программных продуктов для моделирования снеголавинных процессов выявил такие ключевые ограничения, как ограниченная размерность

моделирования (зачастую, 1D/2D), зависимость от упрощенных моделей сплошной среды, отсутствие расчета распределенного давления и углового смещения зданий.

Следует отметить, что при рассмотрении характеристик и возможностей существующих программных комплексов особое внимание было уделено характеристикам, имеющим ключевое значение для адекватного описания динамики лавины и ее взаимодействия с объектами инфраструктуры: трехмерной постановке задачи, локальных характеристиках снежной массы и расчете воздействия на здание. Это обусловлено следующими факторами.

Постановка задачи в трехмерном пространстве (3D) позволяет учитывать не только движение лавины вдоль склона, но и ее распространение в поперечном направлении и изменения по высоте. Это важно, поскольку лавины, как правило, характеризуются сложной фронтальной и вертикальной структурой, а односторонние или двумерные модели не позволяют корректно оценить боковое давление и расслоение снежной массы.

Локальный расчёт плотности с использованием метода SPH позволяет учитывать изменение плотности лавины в каждой точке модельного пространства. Плотность снежной массы существенно влияет на механические свойства потока и, соответственно, на величину сил, возникающих при взаимодействии лавины с препятствием. В отличие от усредненных подходов, метод SPH дает возможность рассчитать реальную локальную плотность, что повышает точность модели.

Определение коэффициентов жесткости на основе локальной плотности позволяет динамически изменять силы взаимодействия между снежными частицами в процессе движения. Это дает более реалистичную картину деформаций и расслоений лавины, в отличие от моделей, где коэффициенты упругости принимаются постоянными.

Расчет распределенного давления на здание обеспечивает возможность определить, на какую часть стены или сооружения приходится основная нагрузка, а также оценить разницу давления по высоте и ширине объекта. Для прогнозирования разрушений и проектирования защитных конструкций важно учитывать именно локальное, а не среднее по потоку давление.

В связи с вышеизложенными недостатками становится актуальным поиск решения задачи моделирования динамики снежных лавин и ее взаимодействия со зданиями, а также выбора численных методов, необходимых для повышения эффективности описания движения снежных масс и снижения связанных с этим затрат вычислительных ресурсов. Решение этой задачи представляется возможным за счет применения гибридной модели, сочетающей в себе преимущества физических и имитационных моделей лавин, оперативность и гибкий гибридный подход. Необходимо отметить, что современные вычислительные мощности позволяют решать такие задачи методом SPH для достаточно больших рассматриваемых объемов снежной массы. Однако при этом метод SPH должен быть модифицирован для описания снежной массы, отличающейся своими физическими свойствами от газообразной, жидкой и твердой сред.

Результаты и обсуждение

Одним из основных параметров модели является коэффициент вязкости k_v , описывающий сопротивление относительно движению между частицами снежной массы. Его введение обусловлено необходимостью корректного моделирования процессов внутреннего трения и демпфирования в слабо сжимаемой среде. В рамках метода гидродинамики сглаженных частиц через коэффициент k_v был реализован механизм численного подавления высокочастотных колебаний, стабилизирующего моделирование физического поведения вязкой среды.

Значения k_B подбирали эмпирически в зависимости от физических свойств моделируемой снежной массы. Для рыхлого и сухого снега характерны значения в пределах 0,01–0,05, в то время как для плотной или мокрой лавины – 0,1–0,3. Подобный диапазон значений согласуется с данными моделирования реальных лавинных событий [13].

В расчетах использовали значение $k_B = 0,15$.

В модель был введен коэффициент d_m , определяющий минимально допустимое расстояние между центрами частиц и рассчитываемый через долю диаметра d_3 . Данное ограничение связано с физической невозможностью бесконечного сжатия снежной массы. В работе при расчетах принимали коэффициент $d_m = 0,2d_3$ [13, 14].

Силу взаимодействия частицы со склоном описывали с учетом двух компонентов: силы отталкивания и силы трения:

$$F_s = F_{iP}^Y + F_{iP}^B, \quad (1)$$

где F_{iP}^Y – сила упругого отталкивания, возникающая при приближении частицы к склону на расстояние меньше половины своего диаметра, зависит от глубины внедрения частицы в склон; F_{iP}^B – сила трения, действующая вдоль поверхности склона, зависит от плотности снежной массы, которая рассчитывается по функции сглаживания.

Сила упругого отталкивания рассчитывалась по формуле:

$$F_{iP}^Y = -k_n \left(\frac{d_q}{2} - d_i \right) \vec{n}_i, \quad (2)$$

где k_n – коэффициент жесткости склона, Н/м; d_q – диаметр частицы, м; $d_i = z_i - z(x_i, y_i)$ – расстояние от центра i -й частицы до поверхности склона, м; \vec{n}_i – единичный вектор нормали, перпендикулярный касательной плоскости к функции $z(x, y)$.

Нормаль к поверхности склона определяли по формуле:

$$\vec{n}_i = \frac{\left(-\frac{dz}{dx}, -\frac{dz}{dy}, 1 \right)}{\sqrt{\left(\frac{dz}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2 + 1}}, \quad (3)$$

где $\frac{dz}{dx}$, $\frac{dz}{dy}$ и 1 (в числителе) – координаты вектора нормали в трёхмерном пространстве, нормированные делением на его длину (в знаменателе), что обеспечивает единичную длину и корректное направление действия силы.

Силу трения рассчитывали по формуле:

$$F_{iP}^B = -\mu(\rho_i) \cdot |F_{iP}^Y| \cdot \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|}, \quad (4)$$

где $\mu(\rho_i)$ – коэффициент трения, зависящий от плотности ρ_i частицы i ; $|F_{iP}^Y|$ – модуль силы упругости; \vec{v} – вектор скорости частицы i , параллельный поверхности склона; $\frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|}$ – единичный вектор направления скорости.

Значения коэффициента трения $\mu(\rho_i)$, характеризующего сопротивление скольжению снежной массы по поверхности склона, подбирали в зависимости от плотности снежной массы. В частности, в данной работе минимальный коэффициент трения для рыхлого снега принимали в пределах $0,2 \leq \mu_{\min} \leq 0,3$, что соответствует слабому сцеплению снежной массы с поверхностью склона. Максимальный коэффициент трения для плотного или мокрого снега варьировали в пределах $0,5 < \mu_{\max} \leq 0,7$, что отражает усиленное сопротивление скольжению в условиях плотной или увлажненной снежной массы. Такой диапазон значений коэффициента трения обеспечивал численную устойчивость модели, позволял адекватно учитывать

физические особенности движения снежной массы по склону и согласуется с данными, представленными в работах [13, 14].

В рамках разработанной трехмерной математической модели область взаимодействия снежных частиц со зданием определяли как буферная зона V_+ , представляющая собой объем пространства вокруг здания, расширенный на половину диаметра частицы ($d_q/2$) во всех направлениях:

$$V_+ = \left[x_{zmin} - \frac{d_q}{2}, x_{zmax} + \frac{d_q}{2} \right] \cdot \left[y_{zmin} - \frac{d_q}{2}, y_{zmax} + \frac{d_q}{2} \right] \cdot \left[z_{zmin} - \frac{d_q}{2}, z_{zmax} + \frac{d_q}{2} \right], \quad (5)$$

где x_{zmin} , x_{zmax} – минимальная и максимальная координата здания по оси X (границы здания по оси X, длина); y_{zmin} , y_{zmax} – минимальная и максимальная координата здания по оси Y (границы здания по оси Y, ширина); z_{zmin} , z_{zmax} – минимальная и максимальная координата здания по оси Z (границы здания по оси Z, высота).

Для описания воздействия лавины на здания выдвинули следующие две альтернативные гипотезы, определяющие условия взаимодействия снежных частиц с сооружениями.

1. Гипотеза H_0 – снежная лавина не взаимодействует со зданием (все снежные частицы находятся вне объема зоны взаимодействия со зданием (так называемой буферной зоны)), что не оказывает разрушительного воздействия на здания.

Если на некотором временном шаге моделирования ни одна снежная частица не находится в буферной зоне здания, т. е. все частицы удовлетворяют условию:

$$\begin{cases} \text{для всех } i \in \{1, \dots, N_q\} \\ x_i(t) > x_{zmin} \text{ и } (r_i(t) \notin V_+ \end{cases} \quad (6)$$

то силовое воздействие снежной лавины на здание отсутствует и $F_{qi-3} = 0$, а траектории частиц рассчитываются без учета отскока от здания.

2. Гипотеза H_1 – снежная лавина взаимодействует со зданием (хотя бы одна снежная частица находится внутри объема зоны взаимодействия), что может привести к разрушительному воздействию в зависимости от интенсивности взаимодействия.

Если на временном шаге хотя бы одна снежная частица попадает в буферную зону, т. е. выполняется условие:

$$\begin{cases} \text{существует } i \in \{1, \dots, N_q\} \\ x_i(t) \leq x_{zmin} \text{ или } (r_i(t) \in V_+ \end{cases} \quad (7)$$

то возникает сила воздействия F_{qi-3} частицы на стену здания (при этом частица упруго отскакивает от поверхности, без проникновения внутрь здания), пропорциональная глубине внедрения и коэффициенту жесткости (т. е. чем глубже частица проникает в буферную зону, тем больше сила), что приводит к ненулевому давлению P_m на стену здания, которое достигает максимальных значений $P_m(l)$ в определенных высотных интервалах Δl . Это давление коррелирует с интенсивностью сил от снежных элементов, попадающих в заданный интервал, и может быть использовано для оценки разрушительного воздействия лавины в зависимости от параметров снега (плотность, вязкость) и динамики движения лавины (скорость, траектория).

Обе гипотезы проверяли на каждом шаге Δt и позволяют переключать режимы расчета сил и давления в зависимости от пространственного распределения частиц относительно буферной зоны здания V_+ .

На Рисунке 1 представлена структурная схема разработанной трехмерной модели движения снежной лавины. Здесь N_q – количество частиц, шт; d_q – диаметр частицы, м; m_q – масса частицы, кг; h_n – высота снежного пласта, м; a – угол наклона склона, градусы; L_3 – длина здания, м; W_3 – ширина здания, м; H_3 – высота здания, м; m_3 – масса здания, кг;

ρ – плотность частицы, кг/м³; F_y – силы упругого взаимодействия, Н; F_ϵ – силы вязкого взаимодействия, Н; c_o и c_c – коэффициенты жесткости упругого взаимодействия частиц (ослабленное и сильное взаимодействие); k_ϵ – коэффициент вязкости; P_m – максимальное распределенное давление снежной лавины по высоте здания; $L_{смещ} = (L_x, L_y, L_z)$ – длина смещения центра масс здания относительно начального положения по осям X, Y, Z , м; $\Delta\phi_z$ – угловое смещение здания, градус).

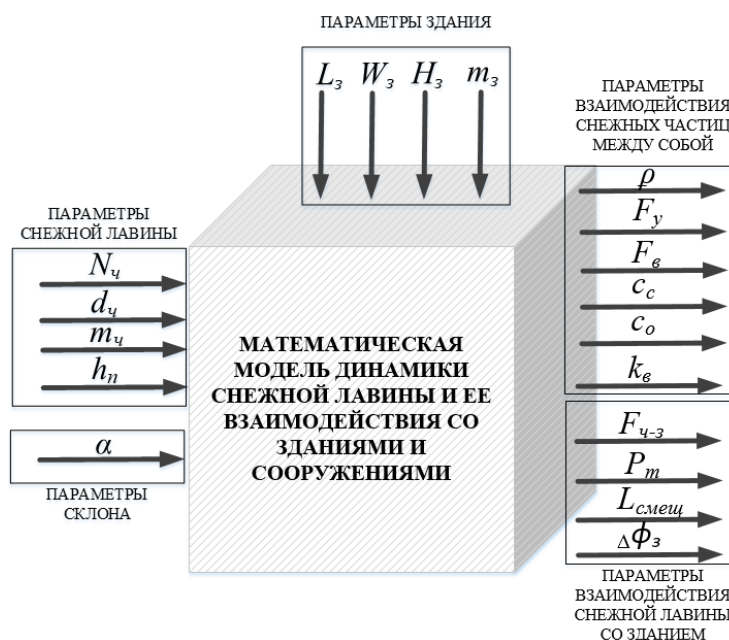


Рисунок 1 – Структурная схема трехмерной модели движения снежной лавины
Figure 1 – Block diagram of a three-dimensional model of the movement of an avalanche

Представленная математическая модель была реализована в виде программы для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации за № 2023683033) – Система поддержки анализа результатов симуляции схода снежной лавины как элемента информационной системы прогнозирования динамики быстроразвивающихся опасных природных явлений.

При расчетах использовали следующие параметры (Таблица 1) [15].

Таблица 1 – Значения параметров модели
Table 1 – Model parameter values

Наименование используемых параметров	Значение параметра
Диаметр частицы снежной массы	$d_q = 0,1$ м
Масса частицы снежной массы снега	$m_q = 0,5$ кг
Количество частиц снежной массы	$N_q = 50000$
Высота снежного покрова	$h_n = 1,0$ м
Угол наклона склона	$\alpha = 24^\circ$
Коэффициент упругого взаимодействия частиц снежной массы между собой	$0,1 \leq c \leq 1,0$
Коэффициент вязкого взаимодействия частиц снежной массы между собой	$0,01 \leq k_v \leq 0,3$
Коэффициент вязкого трения частиц снежной массы со склоном	$0,2 \leq \leq 0,7$
Длительность компьютерного эксперимента	$t_{max} = 47$ с

Компьютерную симуляцию ограничивали модельным пространством, выход за пределы которого для частиц снега полагали невозможным.

Для оценки адекватности модели были использованы реальные данные о сошедшей лавине на юго-западном склоне г. Отдельная в Красноярском крае в пригороде г. Норильск в районе населенного пункта Талнах. По доступным фото- и видеоматериалам была разработана карта смещения и поворота построек под действием лавины, что позволило восстановить их исходное расположение относительно склона и направления движения снежной массы (Рисунок 2).

В модели воспроизведено воздействие снежной лавины на семь построек (№ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8). Хозяйственные строения (№ 5, 9, 10) в расчет не включались, поскольку отличаются по массе и коэффициенту сцепления с поверхностью.

Первый ряд зданий (№ 1, 4, 2, 3) и второй ряд (№ 8, 6, 7) были ориентированы перпендикулярно направлению движения лавины и приняли на себя основной удар снежной массы.

Наибольшее давление пришлось на здание № 1, расположенное ближе всего к горному склону, вследствие чего оно фактически сыграло роль экрана, защитив дома № 8 и 4.

Дополнительно стоит отметить, что перед домом № 4 располагалась конструкция, характеристики которой установить не удалось, поэтому при моделировании для зданий № 8, 4, 6 и 7 толщина снежного покрова учитывалась уменьшенной вдвое. Здание № 2 оказалось ориентировано торцевой частью к направлению лавинного потока, что привело к частичному ослаблению воздействия и, как следствие, к меньшему смещению по сравнению с домами № 1 и 3.

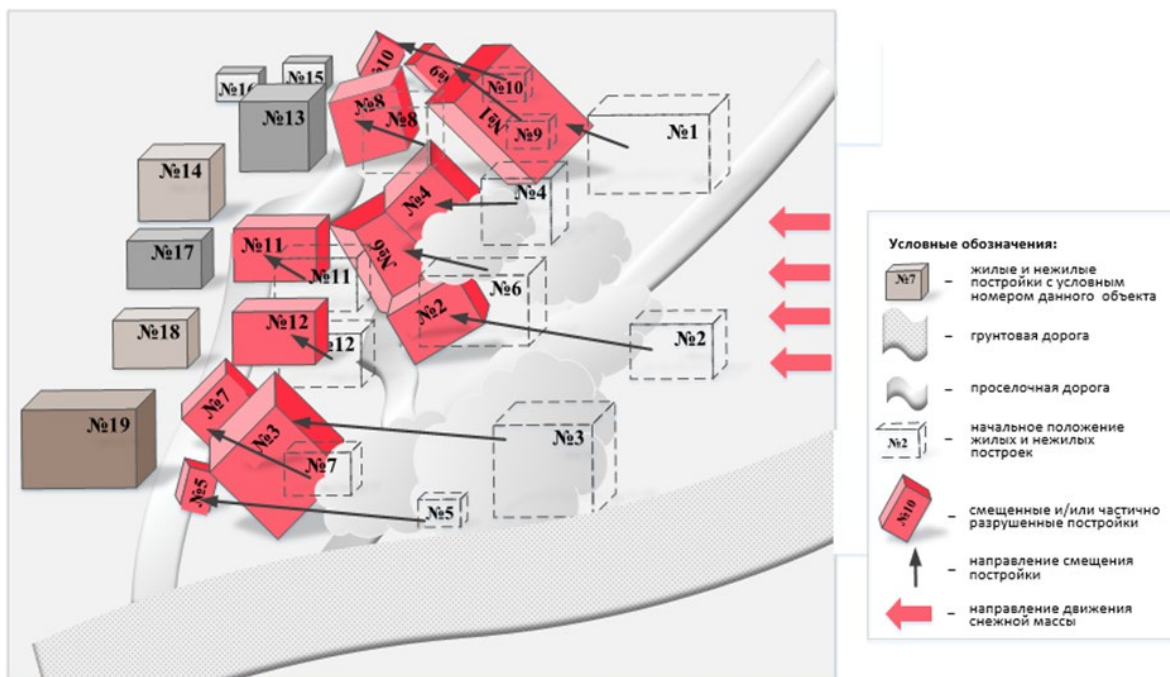


Рисунок 2 – Схематичное изображение построек после схода снежной массы
 Figure 2 – Schematic illustration of buildings after snow avalanche descent

Анализ полученных данных показал, что погрешность восстановления координат домов после смещения не превышает 1,0–1,5 м, а отклонение углового положения зданий составляет 3–4°. Принятые в модели допущения обусловили среднюю погрешность в определении показателей смещения и наклона порядка 8 % (оценка выполнена по

метрике МАРЕ), что является допустимым и подтверждает адекватность модели. Для участков с ровной поверхностью точность еще выше: погрешность снижается до 6,8 %.

Таким образом, модель удовлетворительно воспроизводит реальную схему смещения зданий и сооружений и адекватно описывает разрушительные воздействия снежной лавины.

Заключение

В рамках модели предложены и доказаны две гипотезы взаимодействия снежной лавины со зданиями – отсутствие взаимодействия, когда все частицы находятся вне буферной зоны здания, что исключает разрушительное воздействие; наличие взаимодействия, когда хотя бы одна частица попадает в буферную зону, что может привести к разрушительным последствиям в зависимости от интенсивности воздействия.

Разработана модель движения снежной массы, основанная на модифицированном численном методе гидродинамики сглаженных частиц, обеспечивающем неявную адаптацию к параметрам снежной массы и условиям движения лавины.

Необходимо отметить, что метод отличается от известных подходов заменой параметров снега на безразмерные настраиваемые коэффициенты и классической функции сглаживания на гиперболическую, и позволяет рассчитать параметры созданной трехмерной математической модели динамики снежной лавины при достаточно близком взаимном расположении частиц снежной массы во время сжатия и тем самым предотвратить нефизическое скопление и бесконечно большой разброс частиц снежной массы в пространстве при отрицательном напряжении (положительном давлении).

Разработанная модель позволяет прогнозировать разрушительное воздействие снежных лавин на здания и проводить расчет условий, обеспечивающих допустимый уровень безопасности в лавиноопасных районах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Duvillier C., Eckert N., Evin G., Deschâtres M. Development and Evaluation of a Method to Identify Potential Release Areas of Snow Avalanches Based on Watershed Delineation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2023;23(4):1383–1408. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1383-2023>
2. Katsuyama Yu., Katsushima T., Takeuchi Yu. Large-Ensemble Climate Simulations to Assess Changes in Snow Stability over Northern Japan. *Journal of Glaciology*. 2022;69(275):577–590. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.85>
3. Dkengne Sielenou P., Viallon-Galinier L., Hagenmuller P., et al. Combining Random Forests and Class-Balancing to Discriminate Between Three Classes of Avalanche Activity in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*. 2021;187. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103276>
4. Castebrunet H., Eckert N., Giraud G. Snow and Weather Climatic Control on Snow Avalanche Occurrence Fluctuations over 50 Yr in the French Alps. *Climate of the Past*. 2012;8(2):855–875. <https://doi.org/10.5194/cp-8-855-2012>
5. Pérez-Guillén C., Techel F., Hendrick M., et al. Data-Driven Automated Predictions of the Avalanche Danger Level for Dry-Snow Conditions in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2022;22(6):2031–2056. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2031-2022>
6. Choubin B., Borji M., Mosavi A., Sajedi-Hosseini F., Singh V.P., Shamshirband Sh. Snow Avalanche Hazard Prediction Using Machine Learning Methods. *Journal of Hydrology*. 2019;577. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123929>

7. Evin G., Dkengne Sielenou P., Eckert N., Naveau Ph., Hagenmuller P., Morin S. Extreme Avalanche Cycles: Return Levels and Probability Distributions Depending on Snow and Meteorological Conditions. *Weather and Climate Extremes*. 2021;33. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100344>
8. Hirashima H., Nishimura K., Yamaguchi S., Sato A., Lehning M. Avalanche Forecasting in a Heavy Snowfall Area Using the Snowpack Model. *Cold Regions Science and Technology*. 2008;51(2–3):191–203. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.05.013>
9. Reuter B., Viallon-Galinier L., Horton S., et al. Characterizing Snow Instability with Avalanche Problem Types Derived from Snow Cover Simulations. *Cold Regions Science and Technology*. 2022;194. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103462>
10. Gaume J., Reuter B. Assessing Snow Instability in Skier-Triggered Snow Slab Avalanches by Combining Failure Initiation and Crack Propagation. *Cold Regions Science and Technology*. 2017;144:6–15. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.011>
11. Viallon-Galinier L., Hagenmuller P., Eckert N. Combining Modelled Snowpack Stability with Machine Learning to Predict Avalanche Activity. *The Cryosphere*. 2023;17(6):2245–2260. <https://doi.org/10.5194/tc-17-2245-2023>
12. Mayer S., Techel F., Schweizer J., van Herwijnen A. Prediction of Natural Dry-Snow Avalanche Activity Using Physics-Based Snowpack Simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2023;23(11):3445–3465. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-3445-2023>
13. Bui H.H., Fukagawa R., Sako K., Ohno Sh. Lagrangian Meshfree Particles Method (SPH) for Large Deformation and Failure Flows of Geomaterial Using Elastic–Plastic Soil Constitutive Model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2008;32(12):1537–1570. <https://doi.org/10.1002/nag.688>
14. Monaghan J.J. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 1992;30:543–574.
15. Калач А.В., Лентяева Т.В., Соловьев А.С. Моделирование снежных лавин в пространстве методом динамики частиц. *Информатика и системы управления*. 2024;(3):20–28.
Kalach A.V., Lentyaeva T.V., Solovyov A.S. Modeling Avalanches in Space Using the Particle Dynamics Method. *Information Science and Control Systems*. 2024;(3):20–28. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, профессор Воронежского института ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: a_kalach@mail.ru

ORCID: [0000-0002-8926-3151](https://orcid.org/0000-0002-8926-3151)

Andrey V. Kalach, Doctor of Chemical Sciences, Professor at the Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, the Russian Federation.

Соловьев Александр Семенович, доктор технических наук, профессор Воронежского института ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: asoloviev58@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-6150-1090](https://orcid.org/0000-0002-6150-1090)

Alexander S. Soloviev, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, the Russian Federation.

Лентяева Татьяна Владимировна, старший преподаватель, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: mtv_ef2@mail.ru

ORCID: [0000-0001-6855-8703](https://orcid.org/0000-0001-6855-8703)

Tatyana V. Lentyaeva, Senior Lecturer, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Дурденко Владимир Андреевич, доктор технических наук, доцент, профессор Воронежского института ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.

Vladimir A. Durdenko, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 02.10.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 26.08.2025; approved after reviewing 02.10.2025; accepted for publication 15.10.2025.