

Научная статья

УДК 004.9; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-30-40

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ СНЕЖНОЙ ЛАВИНЫ НА ОБЪЕКТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

✉ Калач Андрей Владимирович.

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия;

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Соловьев Александр Семенович.

Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия.

Лентяева Татьяна Владимировна.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ a_kalach@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены результаты разработки оригинальной модели прогнозирования последствий взаимодействия снежной лавины с элементами инфраструктуры (строениями). Количественные результаты воздействия снежной лавины на строения рассчитывали модифицированным численным методом Эйлера-Коши. Для детального изучения смещения и разрушения построек снежной лавиной создана программная реализация алгоритма решения математической модели. Было проведено компьютерное моделирование разрушительного воздействия снежной лавины на основе официальных данных о сходе лавины в районе склона горы «Отдельная» населенного пункта Талнах (город-спутник г. Норильска Красноярского края).

Показано, что разработанная модель воздействий лавины на объекты инфраструктуры в условиях чрезвычайной ситуации адекватно описывает результаты схода снежной массы.

Представлены результаты объемного моделирования движения лавины объемом в несколько тысяч кубических метров. Модель позволила не только адекватно воспроизвести смещения домов, близкие к реальным, но и восстановить подробную картину механического поведения домов под действием лавины.

Ключевые слова: снег, снежная лавина, моделирование, динамика частиц, эксперимент, имитация, траектория движения

Для цитирования: 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.

Scientific article

COMPUTER SIMULATION OF THE EFFECTS OF AN AVALANCHE ON INFRASTRUCTURE FACILITIES IN EMERGENCIES

✉ Kalach Andrey V.

**Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia;
MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia.**

Soloviev Alexander S.

Voronezh institute of the federal penitentiary service of Russia, Voronezh, Russia.

Lentyayeva Tatyana V.

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russia✉ a_kalach@mail.ru

Abstract: The article discusses the results of developing an original model for predicting the consequences of the interaction of a snow avalanche with infrastructure elements (buildings). Quantitative results of the impact of a snow avalanche on buildings calculated using the modified Euler-Cauchy numerical method. For a detailed study of the displacement and destruction of buildings by a snow avalanche, a software implementation of an algorithm for solving a mathematical model created. A computer simulation of the destructive impact of a snow avalanche carried out based on official data on an avalanche in the area of the slope of mount «Otdelnaya», settlement Talnakh (satellite city of Norilsk, Krasnoyarsk territory).

It shown that the developed model of the impact of an avalanche on infrastructure facilities in an emergency adequately describes the results of snow melting.

The results of volumetric modeling of the movement of an avalanche with a volume of several thousand cubic meters presented. The model made it possible not only adequately reproduce displacements of houses that are close to real ones, but also restore a detailed picture of the mechanical behavior of houses under the influence of an avalanche.

Keywords: snow, snow avalanche, modeling, particle dynamics, experiment, simulation, motion trajectory

For citation: Kalach A.V., Soloviev A.S., Lentyayeva T.V. Computer simulation of the effects of an avalanche on infrastructure facilities in emergencies // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 30–40. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-30-40.

Введение

Для эффективного прогнозирования лавинной опасности необходима информация о прошлом, настоящем и будущем состоянии снежного покрова, динамике микроструктурных и механических свойств снега. Для получения этих данных традиционно используют полевые наблюдения за состоянием снежного покрова, подверженного значительным пространственным изменениям, что ведет к потенциальной нерепрезентативности наблюдений и прогнозов [1–3].

Необходимо отметить, что вероятность схода лавин зависит от механической устойчивости снежного покрова, которая тесно связана со стратиграфией снега. В этом контексте особую актуальность приобретает разработка новых оригинальных моделей динамики снежных лавин, основанных на использовании физических параметров снежных масс. При этом следует отметить факт разработки исследователями физических моделей снежного покрова с 1980-х гг. Первоначально научные исследования лавинных процессов сводились лишь к накоплению статистических данных о метеорологических условиях, толщине снежного покрова, разрушениях объектов инфраструктуры. Снежную лавину представляли в виде материальной точки, «снежной доски». Принципы, на которых были

основаны первые модели, различались лишь методами использования метеорологических данных [1–13]^{1, 2}.

В последние годы все возрастающее влияние на инфраструктуру туризма и спорта в мире оказывает эффективность прогнозирования схода снежных лавин, неразрывно связанная с использованием физических моделей снежного покрова [1].

Использование численных методов для анализа разрушительного воздействия снежных лавин возросло по ряду причин, основной из которых является снижение затрат на выполнение натурных и лабораторных экспериментов. Кроме того, некоторые аспекты поведения снежных лавин до сих пор не изучены, что обуславливает актуальность проведения всестороннего математического моделирования. Следует отметить, что моделирование снежных лавин обладает высоким подобием, при котором количество проводимых статистических замеров практически не ограничено. При использовании такого подхода возможно проводить эксперименты для таких территорий, где проведение исследований на реальных объектах осложняется географическими условиями либо невозможно. При этом следует учитывать, что размер физической модели как горного склона, так и имитируемой снежной массы существенно меньше размеров реальных природных склонов и лавин, поэтому возникают дополнительные допущения, снижающие адекватность модели [10]^{3, 4}.

Однако большинство существующих моделей лавин не учитывают фрагментацию снежной массы при сходе лавины. Разработка современных моделей, в которых учитываются основные механические свойства снега: плотность, модуль упругости, внутренний коэффициент трения, величина деформации, способность к расслоению для прогнозирования последствий взаимодействия снежной лавины со строениями представляет собой актуальную прикладную задачу. Как альтернатива существующим методам дистанционного зондирования Земли имитационное моделирование позволяет обеспечить прогнозирование последствий взаимодействия снежных лавин со зданиями и сооружениями в широком временном диапазоне и заданным пространственным разрешением [6, 14].

Методы исследования

Для решения целого ряда математических и физических задач используют метод разбиения целого на множество элементарных частей, которые описываются более простыми функциями. Последующее интегрирование позволяет получить свойства целого с использованием более простого математического аппарата. Такой метод предлагается использовать для моделирования движения снежной лавины.

Для моделирования движения лавиноопасных снежных масс использовали метод динамики частиц, который по сравнению с концепцией сплошной среды требует меньших предварительных сведений о свойствах моделируемой среды. Весь объем снега разделяли на небольшие части сферической формы (элементы), диаметр которых можно было варьировать от нескольких сантиметров до нескольких дециметров. Количество элементов определяется возможностями вычислительной техники и в данном случае достигает нескольких миллионов.

Движение элементов, их вязкоупругое взаимодействие между собой, горным склоном и различными строениями описывается законами классической механики. Предварительно задавали начальное распределение элементов в пространстве и начальные скорости. Таким образом, задача свелась к решению задачи Коши для системы дифференциальных уравнений.

Здание перемещается в пространстве координат « $x-y-z$ » под действием равнодействующей всех действующих сил и моментов сил в соответствии с законами динамики:

¹ CAIC Statistics and Reporting. URL: <https://www.avalanche.state.co.us/accidents/statistics-and-reporting> (дата обращения: 16.11.2024)

² EAWS Fatalities. URL: <https://www.avalanches.org/fatalities/> (2022) (дата обращения: 16.11.2024)

³ Там же

⁴ Там же.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_3} (F_{x3j-3} - F_{\text{ТрЛ}} - F_{\text{ТрП}}); \\ m_3 \frac{d^2 y_3}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_3} (F_{y3j-3} - F_{\text{ТрЛ}} - F_{\text{ТрП}}); \\ m_3 \frac{d^2 z_3}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_3} (F_{z3j-3} + F_{\text{ФЛ}} + F_{\text{ФП}} - m_3 g); \\ J_3 \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_3} (M(\ddot{F}_{3j-3}) + M(F_{\text{ФЛ}}) + M(F_{\text{ФП}}) + M(F_{\text{ТрЛ}}) + (F_{\text{ТрП}})), \end{array} \right.$$

где m_3 и J_3 – масса здания и его момент инерции относительно центра тяжести (точка С); x_3 , z_3 , y_3 и φ_3 – декартовы координаты здания и угол его наклона; F_{x3j-3} , F_{z3j-3} и F_{y3j-3} – компоненты силы взаимодействия j -го элемента снега со зданием; $M(F_{3j-3})$ – момент указанной силы относительно центра тяжести здания; $F_{\text{ТрЛ}}$, $F_{\text{ТрП}}$ – силы трения в наиболее слабой точке фундамента, удерживающие здание от смещения в горизонтальном направлении; $F_{\text{ФЛ}}$ и $F_{\text{ФП}}$ – силы, действующие на здание со стороны левой и правой опорных точек фундамента; $M(F_{\text{ТрЛ}})$, $M(F_{\text{ТрП}})$, $M(F_{\text{ФЛ}})$, $M(F_{\text{ФП}})$ – моменты перечисленных выше сил относительно центра тяжести здания [6, 14].

Известно, что плотность снега варьируется в диапазоне от 70–150 кг/м³ для свежеснежавшего снега до 917 кг/м³ для чистого льда [15]. В связи с этим основное внимание в исследовании уделено снегу, плотность которого находится в пределах от 370 до 560 кг/м³.

При моделировании были приняты некоторые упрощения. Объекты инфраструктуры – жилые и хозяйственные постройки представляли в виде кубических структур, расположенных на столбчатом фундаменте массой не более 6 т (типичный горный туристический домик). При достаточно интенсивном воздействии лавины эти объекты могли срываться с фундаментов и перемещаться как единое целое. Энергия воздействия снежной лавины обусловлена целым рядом факторов: крутизной склона, толщиной снежного покрова и его структурой, расположением здания. Горный склон представлен плоской поверхностью с постоянным углом наклона, на которой расположен слой снега одинаковой толщины по всему склону.

Абсолютные значения входных параметров модели при базовом компьютерном эксперименте были следующие:

- диаметр элементов снега $d_3 = 0,1$ м;
- масса элемента снега $m_3 = 0,3$ кг;
- количество элементов снега $N_3 = 10^6$;
- коэффициент жесткости взаимодействия элементов снега между собой $c = 300$ Н/м;
- коэффициент вязкого трения элементов снега между собой $k_B = 1,5$ Н·с/м;
- коэффициент жесткости взаимодействия элементов снега со склоном $c_{3C} = 600$ Н/м;
- коэффициент вязкого трения элементов снега со склоном $k_{3C} = 3,0$ Н·с/м [6, 14].

Величина максимального давления снега на половине высоты здания $P_{0,5}$ определяет величину смещения и характер разрушений здания. Расчет перемещения зданий под действием лавины осуществляли методом Эйлера-Коши.

В ранних исследованиях авторов было показано, что наибольшее влияние на разрушительную силу снежной лавины оказывают толщина снежного пласта ($h_{\text{сн}}$), образующего лавину, и угол лавиноактивного склона горы (α) [6].

Динамику смещения исследуемого объекта инфраструктуры ($L_{\text{см}}$) (здание или постройка) в горизонтальном направлении от начального положения под действием снежной лавины рассчитывали следующим образом:

$$L_{\text{см}}(t) = x_{\text{ТС}}(t) - x_{\text{ТС0}}; L_{\text{см.м.}} = \max_{0 < t < t_{\text{КЗ}}} (x_{\text{ТС}}(t) - x_{\text{ТС0}}) \approx x_{\text{ТС}}(t_{\text{КЗ}}) - x_{\text{ТС0}};$$

$$\phi_{\text{н}}(t) = \phi_{\text{ТС}}(t); \phi_{\text{н.м.}}(t) = \max_{0 < t < t_{\text{КЗ}}} \phi_{\text{ТС}}(t),$$

где $t_{кэ}$ – время (модельное) компьютерного эксперимента; $L_{ТС}$ – эффективная длина ТС; Δh – высота элементарной площадки на боковой поверхности ТС (окно усреднения давления по высоте); $t_{нв}$ и $t_{кв}$ – время начала и окончания воздействия снежной лавины на ТС; индексы «t» и «t-» при производных означают текущий момент времени и предыдущий момент времени, отличающийся от текущего на бесконечно малую величину. Для детального изучения смещения и разрушения построек снежной лавиной создана программная реализация алгоритма решения математической модели [14, 16].

Результаты исследования и их обсуждение

Оценку адекватности разработанной модели проводили с использованием реальных данных о повреждениях зданий и сооружений снежными лавинами в районе склона горы «Отдельная» н.п. Талнах (рис. 1), на котором 13 трасс с максимальной длиной 1 500 м и перепадом высот 300 м.

В результате схода лавины в районе горнолыжной трассы горнолыжного комплекса «Гора Отдельная» под снегом оказалось 7 домов, пострадали 5 чел., из них 3 чел. погибли.



Рис. 1. Место схода снежной лавины в районе горнолыжного комплекса (спутниковая фотография окрестности горы «Отдельная» н.п. Талнах (город-спутник г. Норильска Красноярского края))

Известно, что распределение осадков на данной территории в течение года неравномерно. Причем среднее многолетнее количество осадков за год составляет по данным метеостанций: «Норильск» – 399,5 мм; «Талнах» – 688,8 мм. Среднее количество твердых осадков за холодный период составляет 120,2 см. Количество осадков за холодный период года составляет 64–67 % годовых сумм. Число дней с метелями в среднем в течение года – 205. В данном районе повторяемость, характер, объемы, пространственное распространение этих стихийно-разрушительных явлений находятся в сложной взаимосвязи с большим числом природных компонентов. Наибольшую повторяемость имеют лавины свежеснежного и метелевого снега, сходящие на протяжении всего холодного периода года. Часть лавиносбросов действует по несколько раз в год. Объемы таких лавин обычно не превышают 1–3 тыс. м³, однако, по оценкам, в отдельных случаях, могут достигать сотен тысяч м³.

Зона чрезвычайной ситуации (ЧС) (лавиноопасный участок горнолыжного комплекса «Гора Отдельная») находится в 3 км от н.п. Талнах (города-спутника г. Норильска).

Риск возникновения ЧС (происшествий), связанный со сходом снежных масс, характерен для территории Красноярского края и предусматривался в прогнозе возможных ЧС на начало 2021 г. (оперативный прогноз). Следует отметить, что оценка риска схода снежной массы в районе горнолыжных трасс и инфраструктуры горнолыжного комплекса «Гора Отдельная» не проводилась, и реагирование сил и средств на данный риск планом действий предусмотрено не было.

Необходимо отметить, что в лавиноведении прямой эксперимент возможен в редчайших случаях, поэтому компьютерные модели обычно калибруют по известным чрезвычайным происшествиям, которые достаточно полно задокументированы [6].

Снежная лавина в н.п. Талнах подробно описана сотрудниками аварийно-спасательных подразделений Главного управления МЧС России по Красноярскому краю. Эти данные позволили провести анализ особенностей проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ, масштаб разрушений, пути и расстояния смещения строений под воздействием снежной массы, карты компаний «Google» и «Yandex» позволили достаточно подробно описать горный склон, снежную массу и использовать полученный материал для оценки адекватности модели.

Следует отметить, что дома в н.п. Талнах выполнены из древесины и расположены в ряды, перпендикулярные движению лавины. Таким образом, характерные особенности чрезвычайного происшествия в н.п. Талнах хорошо коррелируют с возможностями созданной модели, что позволило провести ряд компьютерных экспериментов с целью верификации объемной модели снежной лавины.

Схема расположения жилых и нежилых построек до схода снежной массы приведена на рис. 2.

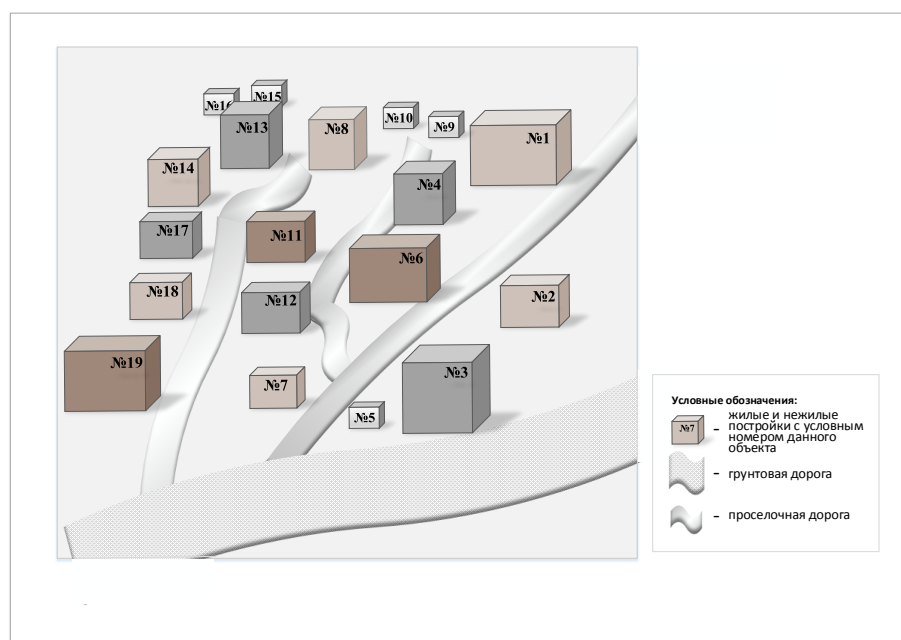


Рис. 2. Схематичное изображение жилых и нежилых построек, максимально близко расположенных к лавиноопасному склону горы «Отдельная» н.п. Талнах, до схода снежной массы

На основе имеющейся информации был реализован компьютерный эксперимент с использованием разработанной объемной модели по сходу снежной лавины и прогнозированию разрушительных последствий этого явления. Анализ географического расположения н.п. Талнах показал, что в данном случае горный склон плавно повышается и достигает максимальной высоты 603 м на расстоянии 1 500 м от поселка. Однако отрыв снежного пласта произошел на расстоянии 900 м от крайних домов. Перепад высот составил 360 м. Таким образом, горный рельеф можно представить плоскостью с углом наклона 24°.

Статистические данные указывают, что при таких углах склона снег может накапливаться в значительных количествах, а сход лавины, скорее всего, бывает связан с колебаниями температуры и образованием приповерхностного слоя изморози в результате перекристаллизации снега.

Геометрия склона и свойства пострадавших строений были изучены достаточно подробно и соответственно учтены при расчетах в виде различных параметров модели. Однако свойства самой снежной массы невозможно получить на расстоянии. Снег является очень сложной изменчивой субстанцией, его свойства сильно зависят от предыдущих погодных условий, температуры, влажности, внутреннего строения и т.д. Вследствие этого представленная модель не дает абсолютно точного описания лавинного процесса. Тем не менее, несмотря на приведенные выше упрощения, модель позволяет прогнозировать условия и время схода лавины, расстояние выбега на горизонтальной поверхности, расстояние смещения легких строений без ленточного фундамента с точностью до 10 %. Исследование свойств снежной массы позволит получить более подробные прогнозы результатов лавинной активности и повысит адекватность модели. Однако экспериментальное изучение свойств снежной массы представляет собой отдельную сложную и дорогостоящую задачу, решение которой в данной работе не планировалось. Использованные допущения позволили упростить вычисления, сократить время проведения компьютерного эксперимента без существенной потери адекватности. Полученные результаты вполне коррелируют с данными МЧС России по Красноярскому краю. В случае необходимости разработанная модель допускает моделирование с гораздо более высокой точностью при более детальном задании параметров лавиноопасного склона горы, параметров снежной массы, геометрических и механических параметров зданий [14].

Очевидно, что дома в н.п. Талнах вполне соответствуют модельным представлениям. Первый ряд домов под номерами 1, 4, 2, 3 и второй ряд – 8, 6, 7 расположены перпендикулярно направлению движения лавины и приняли на себя основной удар снежной массы. Такая конфигурация строений, известные параметры горного склона и снежного покрова позволяют ввести все данные в программу и воспроизвести всю ситуацию в компьютерном эксперименте с целью верификации разработанной модели.

Толщина снежного покрова была принята равной 1,2 м, что является типичным значением для данного склона. Угол склона составил около 24° . По доступным фото- и видеоматериалам восстановлена карта смещения и поворота семи домов под действием лавины (рис. 3).

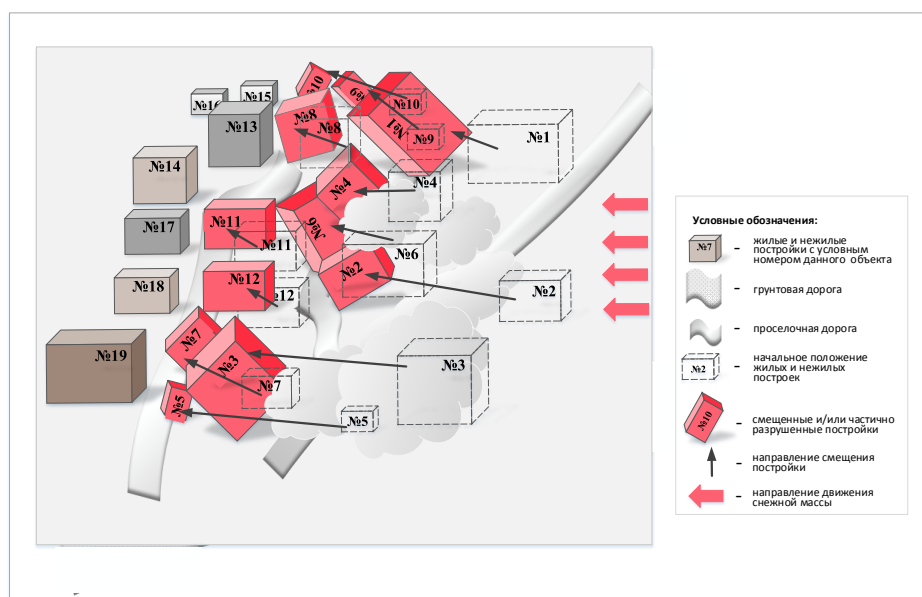


Рис. 3. Схематичное изображение жилых и нежилых построек, максимально близко расположенных к лавиноопасному склону горы «Отдельная» н.п. Талнах, после схода снежной массы

При моделировании воспроизведено взаимодействие семи строений со снежной лавиной (№№ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8). Хозяйственные постройки (№№ 5, 9, 10) не рассматривались, так как имеют совсем иную массу и коэффициент сцепления с поверхностью. Основной удар лавины принял на себя дом № 1. Он сыграл роль экрана для домов 8 и 4. Кроме того, перед домом 4 находится некоторая конструкция, выяснить характеристики которой не представлялось возможным. Поэтому для домов 8, 4, 6, 7 моделирование велось с учетом уменьшения толщины снежного покрова вдвое. Дом под номером 2 был расположен торцом к снежному потоку, и поэтому воздействие на него оказалось несколько ослабленным. Именно этим объясняется его наименьшее перемещение по сравнению с домами 1 и 3.

Погрешность восстановления данным методом координат домов после смещения не превышает 1,0...1,5 м, углового положения домов – 3...4°. Сопоставление смещений моделируемых зданий и сооружений с реальной картой смещений позволяет утверждать, что модель адекватна.

Принятые в модели допущения не являются принципиальными, но приводят к средней погрешности определения показателей смещения зданий и наклона порядка 10 %.

Следует отметить, что разработанная модель допускает моделирование с гораздо более высокой точностью при более детальном задании параметров лавиноактивного склона горы, параметров снежной массы, геометрических и механических параметров зданий. Сравнительный анализ величин смещений в разработанной модели и реальной картой смещений приведен в таблице и позволяет утверждать, что модель адекватна (табл.).

Таблица

Смещения зданий под действием снежной лавины

Номер здания	Смещение $L_{см}$, м		
	реальное	в модели	различие, %
1	35	36,4	4
2	17	18,2	7
3	26	27,2	5
4	18,5	20	8
8	–	–	
6	3,5	4	14
7	7	7,7	10

Заключение

Представленные результаты убедительно доказывают, что математическая модель лавиноопасной снежной массы на основе метода динамики частиц вполне адекватно описывает разрушительные последствия схода лавины. Очевидно, что модель не охватывает все возможные ЧС, присутствует ряд ограничений, главное из которых связано с объемом снега. Для моделирования движения крупной лавины объемом в миллион кубических метров потребуются учесть движение миллиардов элементов снега. Компьютерный эксперимент затянется на неопределенное время. И тем не менее, если в предыдущих работах авторами были показаны результаты оперирования моделирования динамики снежной лавины на плоскости, то в данной статье представлены результаты объемного моделирования движения лавины объемом в несколько тысяч кубических метров. Модель позволила не только воспроизвести смещения домов, близкие к реальным, но и восстановить подробную картину механического поведения домов под действием лавины. Разработанная модель, алгоритм и его программная реализация могут быть использованы для прогнозирования поражающего действия снежных лавин на здания и расчета условий, обеспечивающих допустимый уровень безопасности в лавиноопасных районах.

Список источников

1. Looking to the '20s: Computer-assisted avalanche forecasting in Canada / J.A. Floyer [et al.] // International Snow Science Workshop, Proceedings. USA: Breckenridge, CO, 2016. P. 2016.
2. Bovee M., Srivastava R., Mak B. A conceptual framework and belief-function approach to assessing overall information quality // Int. J. Intell. Syst. 2003. Vol. 18. P. 51–74.
3. Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: a status report on current implementations and prospects for the future / S. Morin [et al.] // Cold regions science and technology. 2020. № 170. P. 102910. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102910.
4. McClung D.M., Clarke G.K.C. The effects of free water on snow gliding // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 6301–6309.
5. Development and validation of a spatial snow-glide model / G. Leitinger [et al.] // Ecological modelling. 2008. Vol. 211 (3-4). P. 363–374. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.09.015.
6. Соловьев А.С. Математическое моделирование чрезвычайных ситуаций, связанных с зарождением и сходом снежных лавин: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2014. 287 с.
7. Development and calibration of a preliminary cellular automata model for snow avalanches / M.V. Avolio [et al.] // Lecture notes in computer science. Vol. 6350. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-15979-4_9.
8. Leguizamón S. Simulation of snow-cover dynamics using the cellular automata approach // Proceeding of the 8th International symposium on high mountain remote sensing cartography. 2005. P. 87–91.
9. Spatial and temporal variability in seasonal snow density / K.J. Bormann [et al.] // J. Hydrol. 2013. Vol. 484. P. 63–73.
10. Colbeck S.C. The layered character of snow covers // Rev. Geophys. 1991. Vol. 29 (1). P. 81–96.
11. In der Gand H., Zupancic M. Snow gliding and avalanches // IAHS-AISH Publ. 1966. Vol. 69. P. 230–242.
12. Laatsch W., Baum U. Faktoren der Wald- und Bodenzerstörung durch Schnee in den Alpen // Geoderma. 1971. Vol. 20. P. 324–333.
13. Aksamit N.O., Pomeroy J.W. Near-surface snow particle dynamics from particle tracking velocimetry and turbulence measurements during alpine blowing snow storms // Cryosphere. 2016. Vol. 10. P. 3043–3062. DOI: 10.5194/tc-10-3043-2016.
14. Карпов С.Л. Модели и алгоритмы взаимодействия снежной лавины со смещаемыми и разрушаемыми препятствиями: дис. ... канд. техн. наук. Тамбов: Тамбовский гос. техн. ун-т, 2021. 176 с.
15. Shoop S.A., Phetteplace G., Wieder W.L. Snow Roads at Mcmurdo Station // Series U.S. Army cold regions research and engineering laboratory. Hanover, New Hampshire, 2010. P. 1–112.
16. Трехмерная модель движения и взаимодействия снежной массы со зданиями и сооружениями: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662161 от 6 июня 2023 г. / Т.В. Лентяева [и др.].

References

1. Looking to the '20s: Computer-assisted avalanche forecasting in Canada / J.A. Floyer [et al.] // International Snow Science Workshop, Proceedings. USA: Breckenridge, CO, 2016. P. 2016.
2. Bovee M., Srivastava R., Mak B. A conceptual framework and belief-function approach to assessing overall information quality // Int. J. Intell. Syst. 2003. Vol. 18. P. 51–74.
3. Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: a status report on current implementations and prospects for the future /

- S. Morin [et al.] // Cold regions science and technology. 2020. № 170. P. 102910. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102910.
4. McClung D.M., Clarke G.K.C. The effects of free water on snow gliding // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 6301–6309.
5. Development and validation of a spatial snow-glide model / G. Leitinger [et al.] // Ecological modelling. 2008. Vol. 211 (3-4). P. 363–374. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.09.015.
6. Solov'ev A.S. Matematicheskoe modelirovanie chrezvychajnyh situacij, svyazannyh s zarozhdeniem i skhodom snezhnyh lavin: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Voronezh, 2014. 287 s.
7. Development and calibration of a preliminary cellular automata model for snow avalanches / M.V. Avolio [et al.] // Lecture notes in computer science. Vol. 6350. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-15979-4_9.
8. Leguizamón S. Simulation of snow-cover dynamics using the cellular automata approach // Proceeding of the 8th International symposium on high mountain remote sensing cartography. 2005. P. 87–91.
9. Spatial and temporal variability in seasonal snow density / K.J. Bormann [et al.] // J. Hydrol. 2013. Vol. 484. P. 63–73/
10. Colbeck S.C. The layered character of snow covers // Rev. Geophys. 1991. Vol. 29 (1). P. 81–96.
11. In der Gand H., Zupancic M. Snow gliding and avalanches // IAHS-AISH Publ. 1966. Vol. 69. P. 230–242.
12. Laatsch W., Baum U. Faktoren der Wald- und Bodenzerstörung durch Schnee in den Alpen // Geoderma. 1971. Vol. 20. P. 324–333.
13. Aksamit N.O., Pomeroy J.W. Near-surface snow particle dynamics from particle tracking velocimetry and turbulence measurements during alpine blowing snow storms // Cryosphere. 2016. Vol. 10. P. 3043–3062. DOI: 10.5194/tc-10-3043-2016.
14. Karpov S.L. Modeli i algoritmy vzaimodejstviya snezhnoj laviny so smeshchaemyimi i razrushaemyimi prepyatstviyami: dis. ... kand. tekhn. nauk. Tambov: Tambovskij gos. tekhn. un-t, 2021. 176 s.
15. Shoop S.A., Phetteplace G., Wieder W.L. Snow Roads at Mcmurdo Station // Series U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire, 2010. P. 1–112.
16. Trekhmernaya model' dvizheniya i vzaimodejstviya snezhnoj massy so zdaniyami i sooruzheniyami: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2023662161 ot 6 iyunya 2023 g. / T.V. Lentyaeva [i dr.].

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 22.10.2024; одобрена после рецензирования: 20.01.2025;
принята к публикации: 27.01.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 22.10.2024; approved after review: 20.01.2025;
accepted for publication: 27.01.2025

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), 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 кафедры проблемно-ориентированных информационных систем института кибербезопасности и информационных технологий 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), 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 at the department of problem-oriented information systems of the institute of cybersecurity and information technologies 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