

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СНЕЖНОЙ ЛАВИНЫ

А.С. Соловьев, А.В. Калач, А.В. Паринов

Рассматриваются вопросы моделирования выноса снежных лавин на горизонтальную поверхность. Предложена модель на основе динамики сглаженных частиц. Модель позволяет воспроизвести широкий спектр явлений, происходящих при сходе, выносе и торможении лавины, учесть большое количество геометрических и физических параметров процесса, определить большое количество характеристик процесса: пространственных и временных распределений, числовых оценок.

Ключевые слова: снег, лавина, горный склон, энергия.

Введение. При прогнозировании лавинной опасности очень важно иметь представление о возможных путях движения лавины и ее энергетических возможностях при выходе на горизонтальный участок местности. В этой связи была поставлена задача разработать высокоадекватную модель выноса лавины, позволяющую по начальному состоянию снежной массы, геометрическим параметрам склона и участка перехода от склона к прилегающей поверхности определить характер схода лавины, а также ее характеристики, позволяющие судить о степени опасности для объектов, расположенных на прилегающем участке.

В качестве таких характеристик могут быть выделены: средняя и максимальная дальности выбега лавины, кинетическая энергия лавины в различных участках прилегающего участка, время прихода лавины и время достижения максимальной кинетической энергии на прилегающем участке и др.

Особенности моделирования зоны распространения лавины. В основе модели выноса лавины лежит разработанная ранее модель зарождения и движения снежной лавины, основанная на методе динамики частиц [1-3]. Однако, если ранее опорная поверхность представлялась в двухмерной модели наклонной прямой или совокупностью сплайнов [4], в данной поверхности состоит из трех участков (рис. 1):

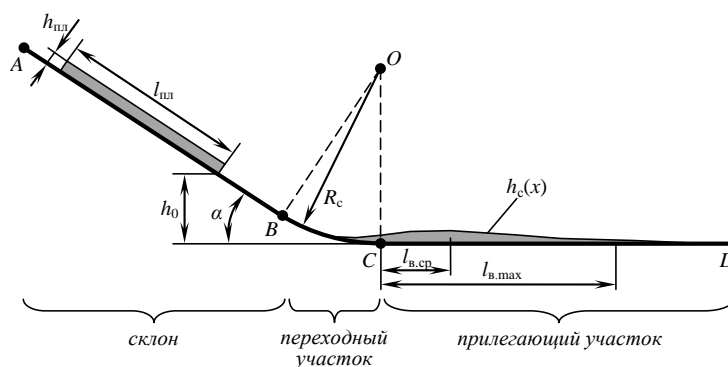


Рис. 1. Геометрические параметры рельефа и снежной массы при решении задачи о дальности выброса лавины

Соловьев Александр Семенович, кандидат физ.-мат. наук, доцент, Воронежский институт ГПС МЧС России; Россия, г. Воронеж

Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, доцент, Воронежский институт ГПС МЧС России; Россия, г. Воронеж, тел.: (473) 236-33-05, e-mail: AVKalach@gmail.com

Паринов Андрей Вячеславович, Производственно-технический центр ФПС по Воронежской области; Россия, Воронеж.

- наклонной прямой (склон);
- дуги окружности (переходный участок);
- горизонтальной прямой (прилегающий участок). Перечисленные участки стыкуются между собой так, чтобы выполнялось условие непрерывности функции поверхности $y(x)$ и непрерывности производной $y'(x)$ функции $y(x)$. Для этого координаты базовых точек поверхности А, В, С, D, О (рис. 1) распределяются в пространстве следующим образом.

$$\begin{aligned}x_C &= 0; y_C = 0; \\x_D &= x_C + L_{\text{пл}}; y_D = 0; \\x_O &= 0; y_O = R_C;\end{aligned}$$

$$x_B = -R_C \sin \alpha; y_B = R_C - R_C \cos \alpha;$$

$$x_A = x_B - L_C \cos \alpha; y_A = y_B + L_C \sin \alpha$$

где $L_{\text{ДУ}}$ – длина прилегающего участка (длина отрезка CD); R_C – радиус переходного участка; L_C – длина склона (длина отрезка AB).

Так же как и в предыдущих моделях, элементы снега, помимо склона взаимодействуют между собой, поэтому после расчета силы на элемент со стороны склона производится расчет сил, действующих со стороны соседних элементов. Уравнения движения элементов и их численное интегрирование производятся также, как и ранее [5].

Снежная масса непосредственно после появления имеет параметры, исключаяющие ее движение и разгон. В определенном момент времени ($t = 10$ с) от начала компьютерного эксперимента скачкообразно изменяется расстояние ограничения взаимодействия и коэффициент вязкого трения элементов снега. Благодаря этому снежная масса становится менее связанной и более подвижной, начинает двигаться по склону под действием сил тяжести, разгоняется, фрагментируется и в модели образует полноценная снежная лавина.

Под конусом выноса снежной массы понимается совокупность элементов снега с координатами x_i более $x = 0$ (границей, определяющей вынос, является начало горизонтального участка – точка С на рис. 1).

Движение снежной массы в процессе выноса

лавины. Для компьютерной реализации метода моделирования и удобства исследования модели разработана компьютерная программа «Программа для моделирования конуса выноса лавины» на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7.0 (рис. 2). Программа предназначена для имитационного моделирования процессов схода и выноса лавины на поверхности заданной конфигурации и расчета основных физических характеристик распространяющейся лавины. При запуске программы на экране появляется множество окон ввода, позволяющих задать основные параметры снежной массы, опорной поверхности, компьютерного эксперимента. При этом на интерфейсную форму вынесены только основные параметры; значительная же часть параметров задается в тексте программы. В процессе работы программа непрерывно выводит на экран компьютера схематичное изображение поверхности и снежной массы в двух масштабах, графики распределения вдоль поверхности высоты снежного покрова, максимальной кинетической энергии, общей кинетической энергии вынесенной снежной массы, а также целый ряд числовых характеристик процесса распространения лавины. Программа рассчитана на использование компьютера не ниже Pentium 2,6 ГГц, объем оперативной памяти не менее 512 Мбайт; исходный текст программы имеет объем около 15 кбайт.

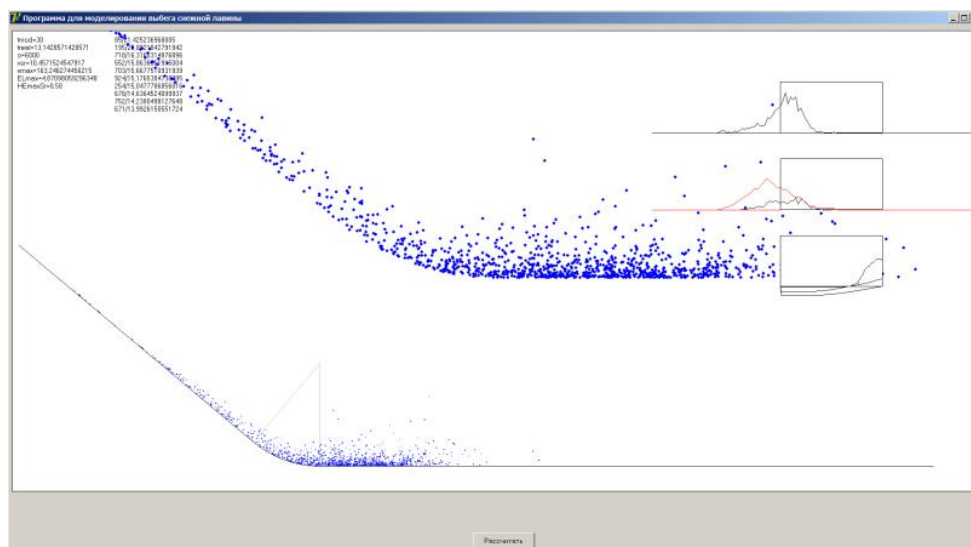


Рис. 2. Форма вывода результатов моделирования в «Программе для моделирования конуса выноса лавины»

Для базового компьютерного эксперимента выбраны следующие параметры рельефа и снежной массы: $\alpha = 40^\circ$; $R_C = 100$ м; $h_0 = 50$ м; $l_{\text{пл}} = 200$ м; $h_{\text{пл}} = 40$ см; $k_{\text{орп}} = 1,03$; $k_{\text{в}} = 0,40$ Н·с/м. Такие параметры соответствуют небольшим лавинам, которые часто образуются в горной местности. Остановимся подробнее на результатах базового компьютерного эксперимента.

Исследуемый процесс целесообразно рас-

сматривать как состоящий из семи этапов.

Этап 1. Начальное состояние снежной массы (рис. 6.4, $t = 0$ с). Снежная масса расположена неподвижно на склоне.

Этап 2. Начало движения снежной массы (рис. 6.4, $t = 5$ с). В результате изменения физических параметров снега снежная масса теряет связность (как внутреннюю, так и со склоном) и начинает двигаться вниз.

Этап 3. Образование лавины (рис. 6.4, $t = 8$ с). По мере ускорения снежной массы под действием сил тяжести происходит фрагментация снежного покрова и вовлечение его в сложное псевдогазообразное движение. К моменту достижения переходного участка лавина приобретает высокую кинетическую энергию.

Этап 4. Начало выбега лавины (рис. 6.4, $t = 10$ с). Преодолевая переходный участок, снежная масса меняет направление движения, практически не теряя при этом кинетическую энергию, так как находится в псевдогазообразном состоянии.

Этап 5. Движение лавины по прилегающей поверхности (рис. 6.4, $t = 12$ с). Под действием на-

копленной кинетической энергии лавина продолжает двигаться в горизонтальном направлении. Нижние слои лавины постепенно останавливаются и формируют снежный покров, верхние же слои, испытывая относительно низкую силу сопротивления, продолжают двигаться с высокой скоростью.

Этап 6. Затухание лавины (рис. 6.4, $t = 17$ с). Постепенно снежная масса тормозится из-за взаимодействия с поверхностью прилегающего участка, и оседает.

Этап 7. Конечное состояние снежной массы (рис. 6.4, $t = 36$ с). После полного торможения лавины переходный и прилегающий участки оказываются засыпанными снежной массой.

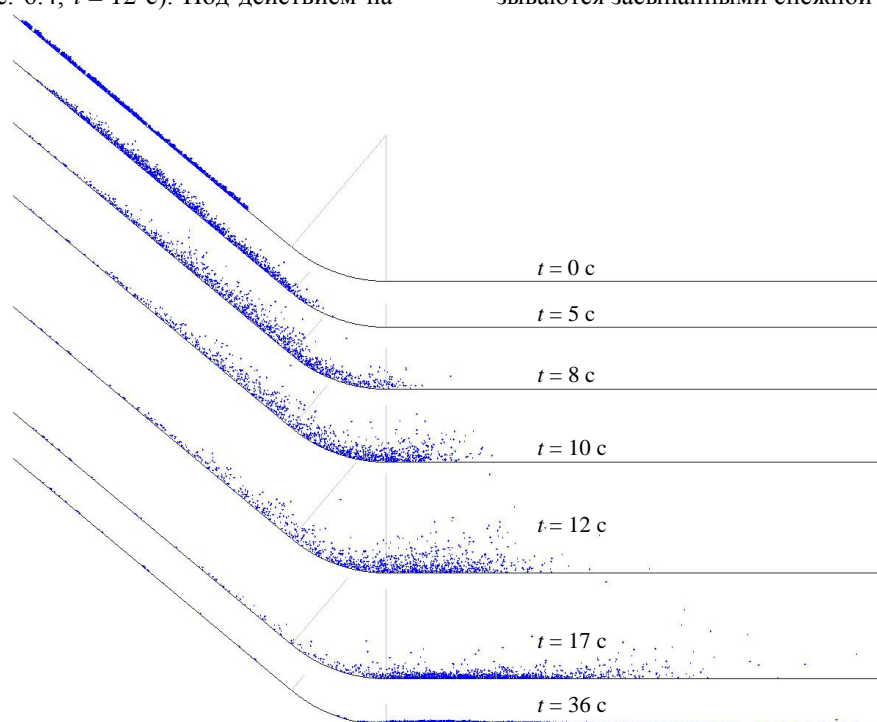


Рис. 3. Этапы схода и выноса лавины

В процессе базового компьютерного эксперимента получены графики первичных характеризующих функций (рис. 4), а также следующие числовые выходные показатели: $l_{в.ср} = 66$ м; $l_{в.макс} = 314$ м; $t_{в} = 6,3$ с; $t_{в.макс} = 12,3$ с; $E_{в} = 4,87$ МДж/м; $h_{Em} = 1,16$ м.

Анализируя первичные характеристики выноса лавины, можно сделать следующие выводы. Типичная лавина, реализуемая в базовом компью-

терном эксперименте, приводит к значительному засыпанию снегом прилегающей к склону территории. Так, судя по графику на рис. 4, а, около 100 м прилегающего участка имеют снежный покров высотой около 60 см. Начиная от расстояния $x = 100$ м от начала горизонтального участка, высота снежного покрова постепенно уменьшается и к расстоянию $x = 300$ м практически полностью исчезает.

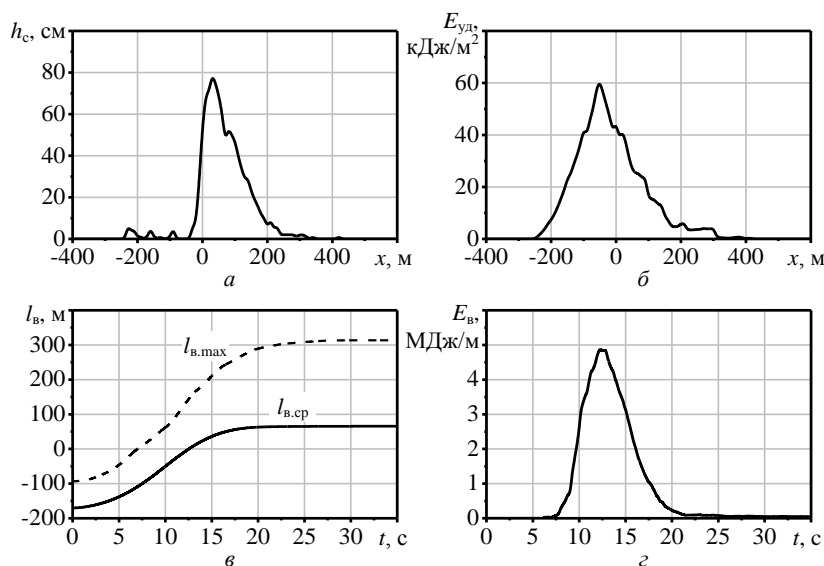


Рис. 4. Первичные характеристики выноса лавины: а – распределение высоты снежного покрова после схода лавины вдоль линии выноса; б – распределение максимальной удельной кинетической энергии вдоль линии выноса; в – временная зависимость максимального $l_{в,маx}$ и среднего $l_{в,ср}$ расстояния выноса лавины; г – временная зависимость полной кинетической энергии лавины

Наибольшую удельную кинетическую энергию движущаяся снежная масса имеет в области переходном участке, о чем свидетельствует положение ($x = -50$ м) пика зависимости $E_{уд}(x)$. Энергия снежной массы от расстояния выноса зависит приблизительно по экспоненциальному закону вида

$$E_{уд}(x) = E_0 e^{-k_{Еуд} x},$$

где E_0 – удельная кинетическая энергия снежной массы в области $x = 0$; $k_{Еуд}$ – коэффициент, определяющий быстроту затухания кинетической энергии. Судя по полученным результатам, кинетическая энергия затухает примерно в три раза на каждые 100 метров выбега. Начиная с расстояния около 300 м удельная кинетическая энергия снежной массы составляет уже менее 1 % от максимальной энергии. Таким образом поражающее действие типичной лавины сосредоточено в пределах расстояния 300 м от подножия склона, и при этом резко уменьшается с расстоянием.

Смещение снежной массы в процессе движения может быть описано сигмоидальной функцией (рис. 4, в). Необходимо отметить, что центр тяжести снежной массы незначительно выходит на горизонтальный участок – приблизительно на 70 м (график $l_{в,ср}(t)$). В то же время незначительная часть снежной массы выбрасывается на расстояние около 300 м (график $l_{в,маx}(t)$). Судя по характеру выхода на насыщение данных графиков, снежная масса в целом останавливается к моменту времени $t = 18$ с, однако наиболее высокоэнергетичные фрагменты снега еще продолжают двигаться ориентировочно до 25 с.

График зависимости полной энергии, распространяющейся по горизонтальному участку снежной массы, от времени $E_в(t)$ имеет вид, близкий к гауссов-

скому, однако пик является несимметричным, с фронтом, более резким, чем спадом (рис. 4, г). При расчете энергии $E_в$ не учитывается энергия снежной массы на склоне, еще не достигнувшей координаты $x = 0$. Судя по графику, вынос начинается ориентировочно через 7,5 с от момента начала движения снега; в течение нескольких секунд энергия резко возрастает и достигает максимума к моменту времени около 12,5 с. Благоприятным обстоятельством является то, что спад энергии происходит так же очень быстро: в течение примерно 7 секунд энергия выбежавшей снежной массы уменьшается более чем в 10 раз. Ориентировочно лавина оказывает поражающее действие в течение 12 секунд (с 8 по 20 секунду от момента начала движения снежной массы).

Выводы. В процессе компьютерного эксперимента удалось определить высоту наибольшего энергетического воздействия снежной лавины в начале горизонтального участка: $h_{Ем} = 1,2$ м. Ориентируясь на это значение, можно ожидать, что выбегающая лавина оказывает «подрезающее» воздействие на объекты инфраструктуры (здания, хозяйственные постройки), оказывая наибольший удар в нижнюю их часть, и «сдвигающее» воздействие на людей, крупных животных и автотранспорт, оказывая наибольшее ударное воздействие в среднюю их часть.

Необходимо отметить широкие возможности разработанной модели выноса снежной лавины. Модель позволяет воспроизвести широкий спектр явлений, происходящих при сходе, выносе и торможении лавины, учесть большое количество геометрических и физических параметров процесса, определить большое количество характеристик процесса: пространственных и временных распределений, числовых оценок.

Библиографический список

References

1. Соловьев, А.С., Калач А.В. Математическое моделирование движения лавиноопасных снежных масс / А.С. Соловьев, А.В. Калач // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т.56. – № 2. – С. 71 – 75.
2. Соловьев, А.С., Шагин, С.И., Калач, А.В. Корреляционный анализ параметров снежных лавин / А.С. Соловьев, С.И. Шагин, А.В. Калач // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». - 2014. - № 1. - С. 1-4.
3. Соловьёв, А.С., Калач, А.В. Определение зависимостей между параметрами снежной лавины на основе статистического анализа / А.С. Соловьев, А.В. Калач // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 1. – С. 33–41.
4. Соловьев, А.С., Калач, А.В. Представление поверхности склона в модели схода снежной лавины / А.С. Соловьев, А.В. Калач // Вестник Воронежского института МВД РФ. – 2012. – № 4. – С. 92-96.
5. Соловьев, А.С. Некоторые закономерности схода снежных лавин на горных склонах различной формы / А.С. Соловьев, А.В. Калач, С.Л. Карпов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 38 – 40.

1. Solovev, A.S., Kalach A.V. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya lavinoопасnykh snezhnykh mass / A.S. Solovev, A.V. Kalach // Sistemyi upravleniya i informatsionnyie tehnologii. – 2014. – T.56. – № 2. – S. 71 – 75.
2. Solovev, A.S., Shagin, S.I., Kalach, A.V. Korrelyatsionnyiy analiz parametrov snezhnykh lavin / A.S. Solovev, S.I. Shagin, A.V. Kalach // Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhbyi MChS Rossii». - 2014. - № 1. - S. 1-4.
3. Solovev, A.S., Kalach, A.V. Opredelenie zavisimostey mezhd parametrami snezhnoy lavinyi na osnove statisticheskogo analiza / A.S. Solovev, A.V. Kalach // Pozharyi i chrezvyichaynyie situatsii: predotvraschenie, likvidatsiya. – 2013. – № 1. – S. 33–41.
4. Solovev, A.S., Kalach, A.V. Predstavlenie poverhnosti sklona v modeli shoda snezhnoy lavinyi / A.S. Solovev, A.V. Kalach // Vestnik Voronezhskogo instituta MVD RF. – 2012. – № 4. – S. 92-96.
5. Solovev, A.S. Nekotoryie zakonomernosti shoda snezhnykh lavin na gornyykh sklonakh razlichnoy formy / A.S. Solovev, A.V. Kalach, S.L. Karpov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: sistemnyiy analiz i informatsionnyie tehnologii. – 2013. – № 1. – S. 38 – 40.

**FEATURES OF MATHEMATICAL MODELLING
ZONES OF DISTRIBUTION OF AVALANCHES**

Kalach A. V.,
D. Sc. in Chemistry, Assoc. Prof.,
Voronezh Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Russia, Voronezh, e-mail: AVKalach@gmail.com
Solovev A.S.,
Ph. D. in Engineering, Assoc. Prof.,
Voronezh Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Russia, Voronezh
Parinov Andrei V.,
Production and Technical Center FPS
in the Voronezh region; Russia, Voronezh.

The article deals with modeling the removal of avalanches on a horizontal surface. We propose a model based on smoothed particle dynamics. The model allows to reproduce a wide range of phenomena occurring at the gathering, removal and inhibition of avalanches, considering the large number of geometrical and physical parameters of the process, to identify a large number of characteristics of the process: the spatial and temporal distributions, numerical estimates.

Keywords: snow, avalanche, mountain slope, energy.