

А.С. Соловьев¹, А.В. Калач¹, С.Л. Карпов²

(¹Воронежский институт ГПС МЧС России, ²Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; e-mail: a_kalach@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХОДА СНЕЖНОЙ ЛАВИНЫ ПО ЗАДАНЫМ ГЕОГРАФИЧЕСКИМ КООРДИНАТАМ

Предложен метод математического описания горных склонов с последующим моделированием состояния снежной массы на таком склоне. На примере лавиноопасного участка железной дороги показана практическая приемлемость метода.

Ключевые слова: снег, лавина, горный склон.

A.S. Soloviev, A.V. Kalach, S.L. Karpov

MODELLING OF THE DESCENT OF THE AVALANCHE ON THE SET GEOGRAPHICAL COORDINATES

The method of the mathematical description of hillsides with the subsequent modeling of behavior of snow weight on such slope is offered. On the example of avalanche danger section of railroad shown practical acceptability of method.

Key words: snow, avalanche, hillside.

Во многих горных регионах России в зимний период происходит сход снежных лавин, которые наносят серьезный экономический урон и приводят к гибели людей. Для прогнозирования схода лавины, оценки ущерба от неё, а также для разработки мер защиты от лавин целесообразно использовать математическое моделирование. Моделирование существенно упрощает и ускоряет исследование снежной лавины, по сравнению с экспериментальным исследованием. Лавина образуется в случайный момент времени в случайном месте и сходит за короткое время, что сложно зафиксировать исследовательским оборудованием. Кроме того, уровень кинетической энергии движущейся снежной массы опасен для исследовательского оборудования и самих исследователей [1]. В то же время, в последние десятилетия появилась возможность использовать высокопроизводительную вычислительную технику для компьютерного моделирования сложных и быстротекущих процессов. Ранее нами был разработан математический аппарат и серия компьютерных программ для моделирования схода снежной лавины [2, 3]. Имитационная модель схода лавины позволяет определить, как поражающее действие лавины зависит от таких параметров, как толщина снежного покрова, состояние снега, температура, угол склона. Одним из наиболее важных факторов, определяющих вероятность и характер схода снежной лавины, является рельеф поверхности склона.

Целью данной работы являлась разработка метода оценки поражающего действия снежной лавины в конкретной местности на основе компьютерного моделирования.

Ранее нами разработан *метод восстановления рельефа* реальной поверхности по топографической карте склона. Используя изображение линий схода лавин на топографическом плане (рис. 1), можно восстановить функцию рельефа поверхности $h(x)$, где x – горизонтальная координата вдоль склона; h – вертикальная координата. Функцию $h(x)$ можно в дальнейшем использовать в двумерной X - H -модели схода снежной лавины.

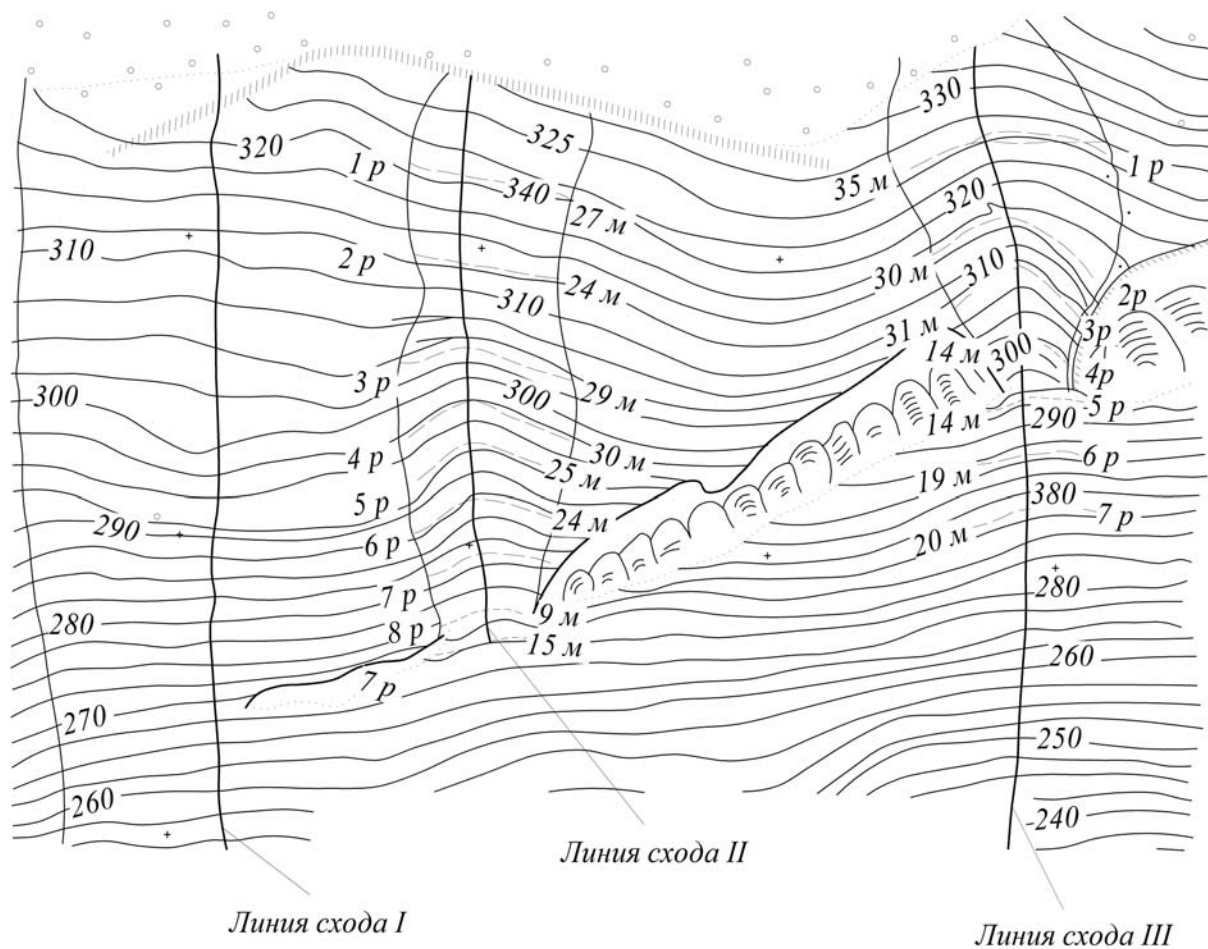


Рис. 1. Топографический план лавиноопасных склонов на 437 км перегона Малиновка-Осман с указанием трех линий, вдоль которых наиболее часто сходят снежные лавины [4]

Метод восстановления рельефа состоит из двух этапов. На первом этапе необходимо перенести с топографического плана координаты точек пересечения линии схода лавины с линиями уровня. Однако получающееся при этом множество базовых точек поверхности (x_i, h_i) является достаточно грубым описанием рельефа поверхности. Поэтому на втором этапе производится сплайн-интерполяция поверхности склона между базовыми точками [5]. При этом функция рельефа поверхности $h(x)$ задается как множество многочленов второго порядка, стыкующихся между собой в базовых точках. В этом случае график функции представляет собой множество парабол, плавно переходящих одна

в другую в базовых точках. Таким образом, между точками (x_i, h_i) и (x_{i+1}, h_{i+1}) профиль поверхности описывается функцией

$$h(x) = a_i \cdot x^2 + b_i \cdot x + c_i, \quad (1)$$

где a_i, b_i, c_i – коэффициенты квадратного трёхчлена, интерполирующего поверхность склона вправо от базовой точки (x_i, h_i) .

Коэффициенты интерполирующих трёхчленов находятся из решения следующей системы уравнений [5]:

$$\begin{cases} a_i = \frac{h_{i+1} - h_i - d_i(x_{i+1} - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)^2}, \\ b_i = d_i - 2a_i \cdot x_i; \\ c_i = h_i - a_i \cdot x_i^2 - b_i \cdot x_i, \end{cases} \quad (2)$$

где d_i – производная функции в i -й базовой точке, определяемая по формуле:

$$d_i = \begin{cases} \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1}, & \text{при } i = 1; \\ 2a_i x_{i+1} + b_i, & \text{при } i > 1. \end{cases} \quad (3)$$

Полученные с помощью разработанного метода функции рельефа поверхности $h(x)$ для трех линий схода лавин 437 км перегона Малиновка-Осман представлены на рис. 2.

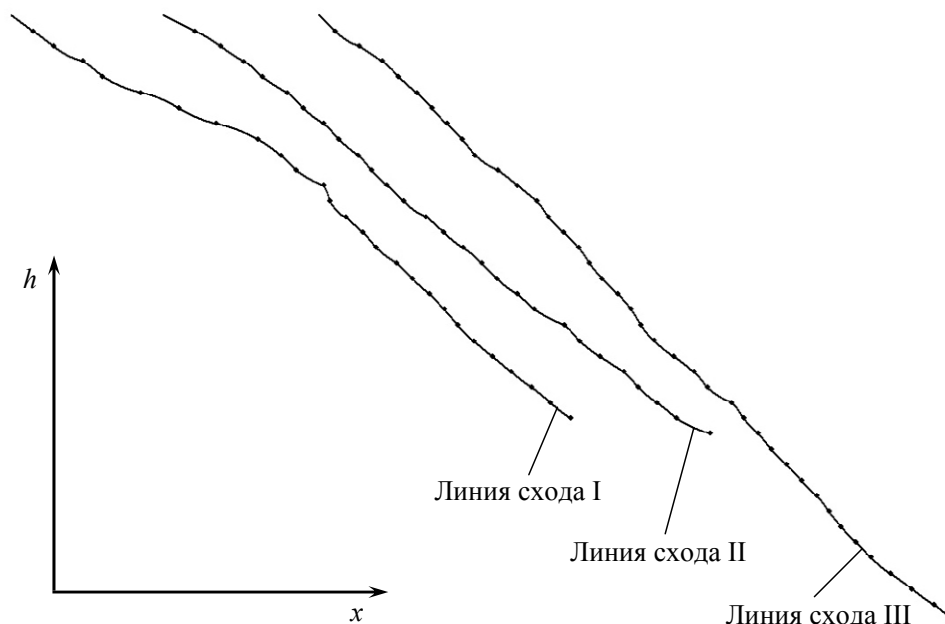


Рис. 2. Восстановленные поверхности склона вдоль трёх линий наиболее частого схода лавин на топографической карте 437 км перегона Малиновка-Осман

Для оценки поражающего действия снежной лавины полученные функции рельефа поверхности $h(x)$ были заложены в разработанную нами ранее имитационную компьютерную модель схода снежной лавины. Данная модель является упрощённой модификацией SPH-метода (Smoothed Particles Hydrodynamics), который в настоящее время является наиболее адекватным методом моделирования сред, склонных к фрагментации [6]. Моделирование зарождения и схода лавины проводится в двухмерном пространстве (x, h) . Снежная масса представлена большим количеством (порядка 10^4) элементов-кругов, имитирующих отдельные фрагменты снега и движущихся по законам классической механики [6]. Механические свойства снежной массы закладываются в выражение для силы взаимодействия между двумя элементами. В модели между элементами действуют упругие (потенциальные) силы и силы вязкого трения (диссипативные). Упругая сила взаимодействия элементов i и j зависит от расстояния между ними $F_{ij}(r_{ij})$ и задается линейной зависимостью

$$F_{ij}(r_{ij}) = c \cdot (r_{ij} - d_{\text{Э}}), \quad (4)$$

где c – коэффициент жесткости, рассчитываемый по модулю упругости снежной массы;

$d_{\text{Э}}$ – диаметр элементов снега.

При этом, если расстояние r_{ij} превышает некоторое критическое расстояние r_k , в модели происходит отрыв двух элементов друг от друга (то есть обнуление силы взаимодействия). Обычно в моделях данного класса выбирают $r_k = k_{\text{огр}} \cdot d_{\text{Э}}$, причем коэффициентом $k_{\text{огр}}$ можно задавать свойство снежной массы по фрагментации. При $k_{\text{огр}} = 1,0$ воспроизводится рассыпчатый снег (могут возникать только силы отталкивания между элементами, но не притяжения). При $k_{\text{огр}} = 1,2$ воспроизводится липкий мокрый снег (могут возникнуть как силы отталкивания при $r_{ij} < d_{\text{Э}}$, так и силы притяжения при $d_{\text{Э}} < r_{ij} < r_k$). Для задания вязкой составляющей силы взаимодействия элементов используется общепринятая пропорциональная зависимость силы от скорости движения двух элементов по отношению друг к другу.

Таким образом, движение снежной массы описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, которые численно интегрируются по времени усовершенствованным методом Эйлера-Коши [7].

В начальный момент времени снежная масса помещается на склон $h(x)$ и имеет параметры, обеспечивающие её неподвижное состояние на склоне. Через некоторое время в модели изменяются параметры снежной массы (коэффициент сцепления $k_{\text{огр}}$) таким образом, чтобы инициировать сход лавины. Снежная масса сначала медленно сползает по склону, затем постепенно переходит в прыгающее фрагментированное состояние, то есть в полноценную лавину (рис. 3 и 4).

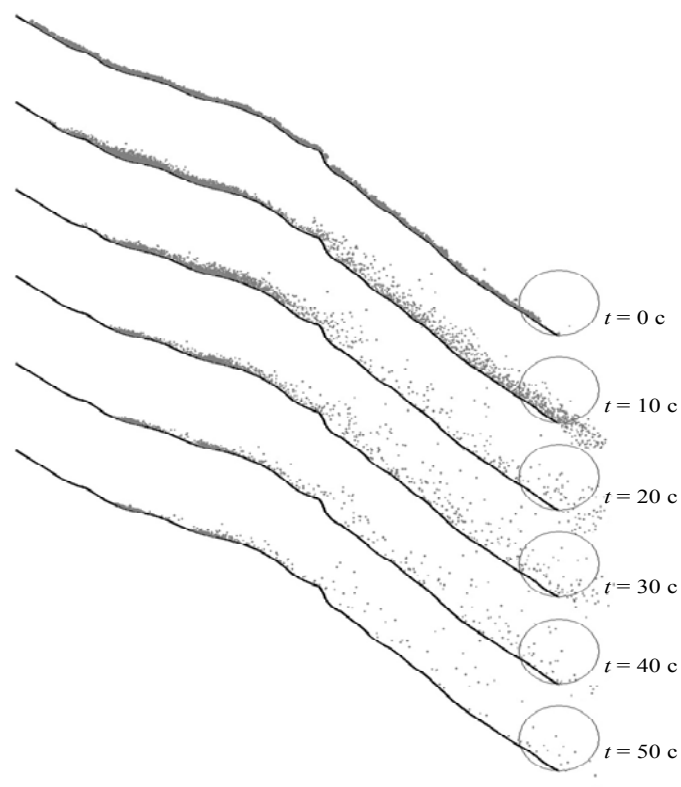


Рис. 3. Результат моделирования: сход снежной лавины на 437 км
перегона Малиновка-Осман по линии схода I

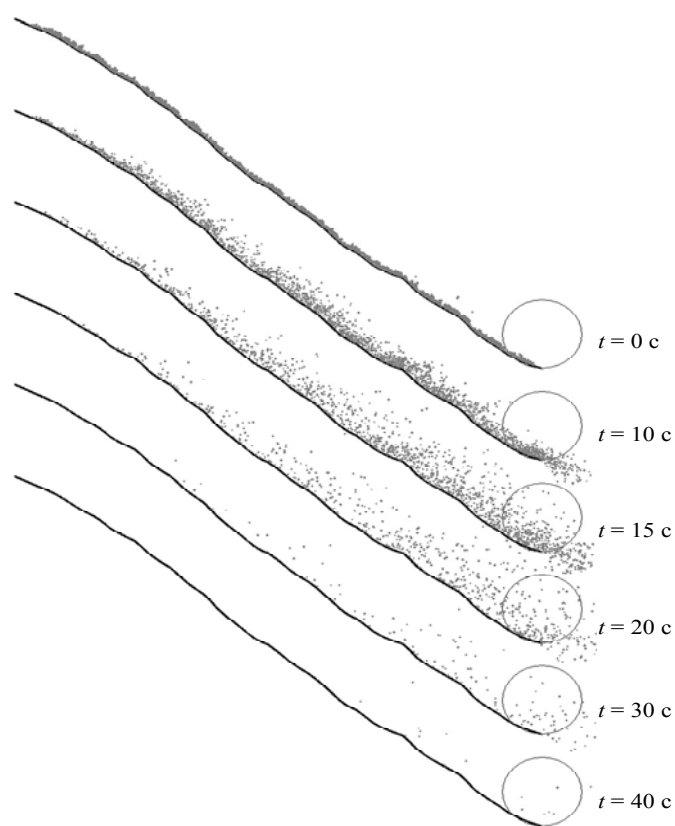


Рис. 4. Результат моделирования: сход снежной лавины на 437 км
перегона Малиновка-Осман по линии схода II

Динамика схода лавины зависит от рельефа склона. Так, например, по линии схода I склон состоит из двух протяженных частей: верхняя половина склона является более пологой, нижняя – более крутой (рис. 3). Поэтому сначала снежная масса быстро сходит с нижней части склона, затем снежная масса с верхней части склона также достигает высокой скорости, превращается в полноценную лавину и обеспечивает вторую поражающую волну. Двухэтапный характер схода лавины можно проследить на графике $E_{кин}(t)$ – графике временной зависимости кинетической энергии снега, движущегося в круге радиусом 5 м в нижней части склона (рис. 5).

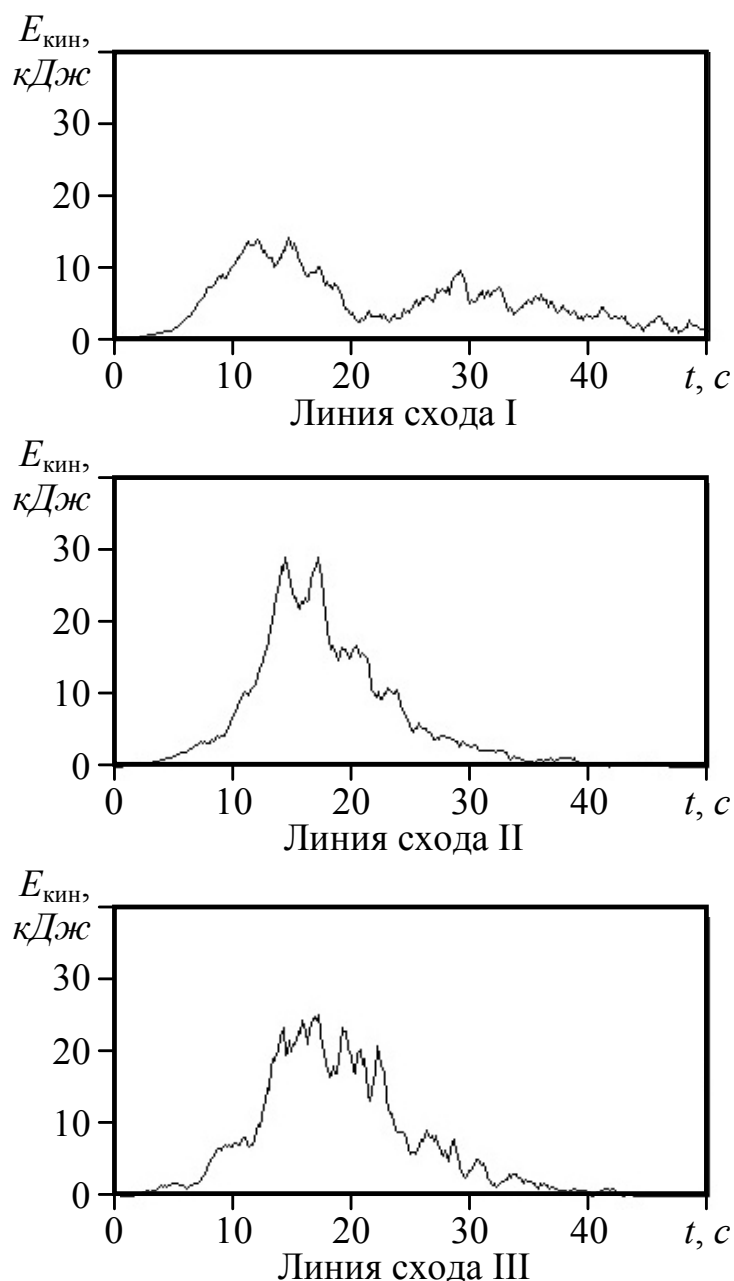


Рис. 5. Поражающее действие снежной лавины для разных линий схода (зависимость от времени кинетической энергии, воспринимаемой объектом шарообразной формы, расположенным в нижней точке поверхности склона горы)

Определённая таким образом энергия $E_{кин}$ характеризует поражающее действие снежной лавины на объект, расположенный внизу склона (например, жилой дом или хозяйственная постройка). Для линии схода I поражаемый объект испытывает два всплеска энергии (рис. 5, линия схода I).

Первый всплеск энергии достигает 15 кДж (значения энергии приведены для объекта шириной 1 м ; ширина измеряется в направлении, перпендикулярном x и h , то есть поперёк склона) и наблюдается в период $10\text{-}15 \text{ с}$ от начала схода снежной лавины. Он обусловлен тем, что снег сходит с нижней, более крутой, половины склона.

Второй всплеск энергии достигает примерно 8 кДж и наблюдается в период $25\text{-}35 \text{ с}$. К этому времени снег с верхней, более пологой части склона, достигает нижней части склона и воздействует на объект. Из-за того, что склон состоит из двух частей (более крутой и более пологой), поражающее действие лавины равномерно распределяется по времени, в результате чего, максимальная кинетическая энергия не превышает 15 кДж .

Если же склон не имеет перегибов, а близок к линейному (линии схода II и III), поражающее действие лавины существенно выше. Так, для линии схода II максимальная кинетическая энергия достигает почти 30 кДж в интервале времени $15\text{-}18 \text{ с}$ от начала схода лавины, а для линии схода III достигает 25 кДж в интервале времени $15\text{-}22 \text{ с}$ (рис. 5). На склоне прямолинейной формы лавина уже не делится на две части, а сходит единым целым (рис. 4). Поэтому наиболее опасно размещение объектов инфраструктуры внизу склонов прямолинейной формы. Наличие существенного рельефа у склона значительно ослабляет лавину.

Разработанная модель позволяет для одного и того же склона оценить поражающее действие лавин с различными параметрами (в частности, с разным состоянием снега – от сухого рассыпчатого, до мокрого тающего).

Проведена серия компьютерных экспериментов по сходу лавин на склоне I с различными значениями коэффициента вязкого трения k_B : от $0,30$ до $0,45 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ с шагом $0,05 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$. При малом коэффициенте вязкого трения (сухой рассыпчатый снег) характер поражения объекта внизу склона практически не зависит от значения k_B (рис. 6, $k_B = 0,30$ и $0,35 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$).

Для лавины из сухого рассыпчатого снега двухэтапность схода на склоне I существенно не выражена, лавина лишь несколько распределена по времени, по сравнению с линейными склонами II и III. В случае сухого рассыпчатого снега поражающее действие достигает 25 кДж .

В случае же мокрого снега (рис. 6, $k_B = 0,45 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$) потенциальная энергия движущейся вниз по склону снежной массы сильно рассеивается внутри снежной массы и при взаимодействии с поверхностью склона, поэтому поражающее действие не превышает 10 кДж .

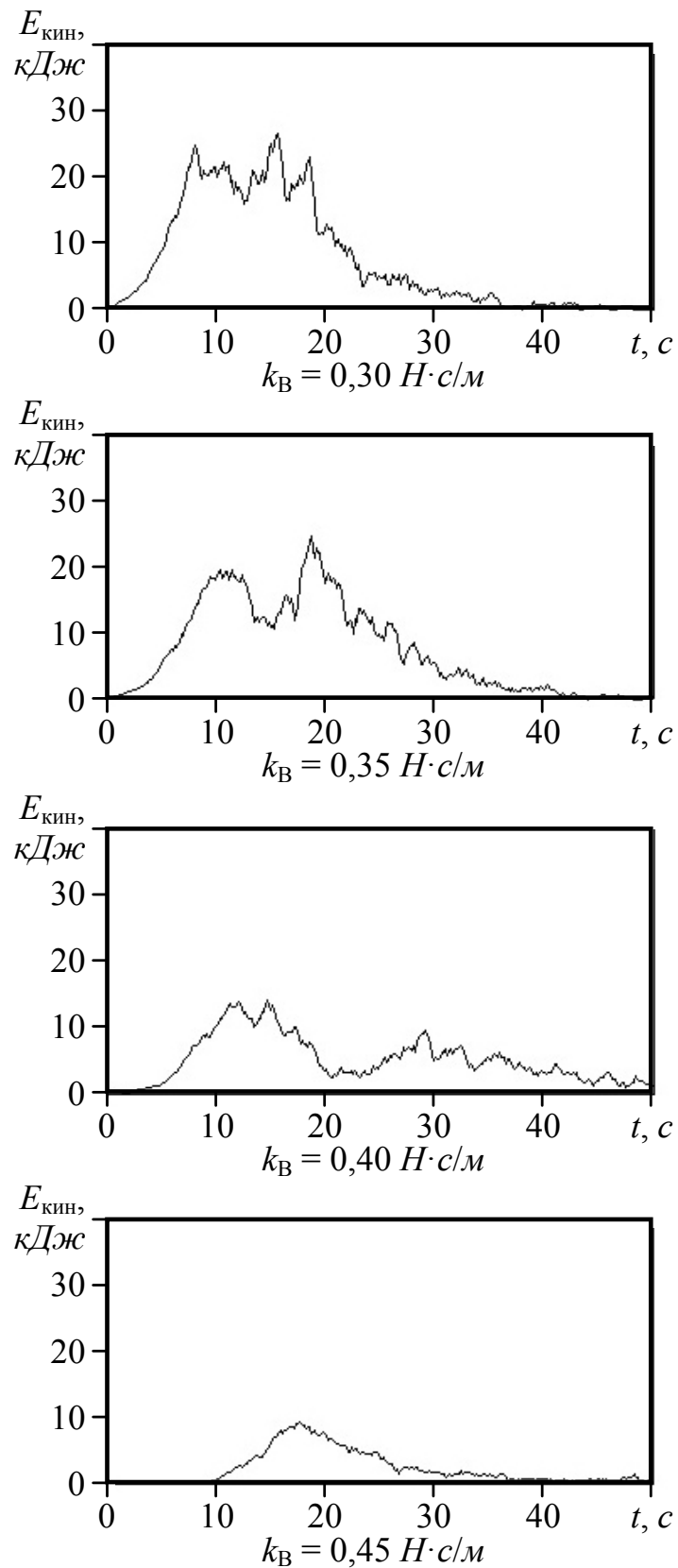


Рис. 6. Поражающее действие снежной лавины $E_{кин}(t)$ на линии схода I для различного состояния снежной массы, задаваемого коэффициентом вязкого трения элементов снега k_B

Обобщая изложенный в статье материал, можно сформулировать следующие выводы.

1. С помощью разработанного ранее метода переноса рельефа реального склона в модель восстановлен рельеф поверхности лавиноопасного склона 437 км перегона Малиновка-Осман [4] по трем линиям наиболее частого схода лавин.

2. С использованием рельефа трех реальных склонов произведено моделирование схода снежных лавин с оценкой их поражающего действия.

3. Имитационное компьютерное моделирование позволяет предсказать характер поражающего действия лавины – получить временную зависимость энергии воздействия лавины на объект внизу склона.

4. Лавины, образующиеся на прямолинейном склоне, оказывают большее поражающее воздействие, по сравнению с лавинами на склонах, имеющих значительный рельеф.

5. Лавины из сухого рассыпчатого снега оказывают ориентировочно в 2,5 раза большее поражающее действие, по сравнению с лавинами из мокрого тающего снега.

Литература

1. *Исследование* взаимодействия снежной лавины с элементами защитных сооружений / Соловьев А.С., Лебедев О.М., Калач А.В., Петренко В.В // Технологии гражданской безопасности, 2012. Т. 9. № 2 (32). С. 74-77.

2. *Лебедев О.М., Соловьев А.С., Калач А.В.* "Лавина – С": информационная система прогнозирования последствий схода лавин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, 2012. № 1. С. 55-59.

3. *Соловьев А.С., Калач А.В., Псарев С.А.* Программа для моделирования взаимодействия снежной лавины с препятствием "Барьер-С" // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615006 от 5.06.2012 г.

4. *Шевчук С.С.* Определение параметров снегоудерживающих сооружений при проектировании защиты железных дорог от лавин: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Новосибирск, 2006.

5. *К. Де Бор.* Практическое руководство по сплайнам. М.: "Радио и связь". 1985. 304 с.

6. *Particle Based Simulation of Fluids* / Premoze S., Tasdizen T., Bigler J. et al. // Eurographics, 2003. Vol. 22. № 3. P. 103–113.

7. *Соловьев А.С., Калач А.В., Псарев С.А.* О природе снежной лавины // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, 2012 г. № 2. С. 4-9.

Статья опубликована 22 апреля 2013 г.