

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ О ВОВЛЕЧЕННЫХ В ЛАВИНУ ОБЪЕКТАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Д.А. Боброва, И.А. Кононов, Н.А. Казаков

*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал,  
693023, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25, Россия; darya-kononova@yandex.ru*

На основе наблюдений взаимодействия двух объектов рассчитаны скорость лавины в момент ее столкновения с трактором, скорость системы “лавины–трактор” после столкновения, пиковое давление лавины на трактор. Определены масса части лавины, взаимодействующей с трактором, и коэффициент трения его о снег. Для расчета скорости лавины использована модель материальной точки. Лавина представлена как тело постоянного объема, которое, двигаясь вниз по лавиносбору с трением о поверхность старого снега, врезается в другое тело (трактор). Значения динамических характеристик лавин, рассчитанные по полученным уравнениям, соотносятся с эмпирическими данными и результатами расчета по известным методикам.

*Транспортное средство, скорость лавины, давление лавины, коэффициент трения, масса лавины*

## ON THE POSSIBILITY OF USING THE DATA ON THE OBJECTS INVOLVED IN AN AVALANCHE FOR THE ESTIMATION OF ITS PARAMETERS

D.A. Bobrova, I.A. Kononov, N.A. Kazakov

*Far East Geological Institute, FEB RAS, Sakhalin Department,  
693023, Yuzhno-Sakhalinsk, Gorkogo str., 25, Russia; darya-kononova@yandex.ru*

On the basis of data on the interaction of two objects some dynamic characteristics of the avalanche (the avalanche speed and the speed of a vehicle moving in the body of the avalanche, pressure of avalanche on the tractor) are calculated. The mass of the avalanche, which interacts with the tractor, and the coefficient of friction of the tractor on snow are also determined. To calculate the speed of the avalanche, we used a model of material point. We regard the avalanche as a body with a constant volume, which moves down with friction on the surface of old snow and crashes into another body (a vehicle). The values of the dynamic characteristics of avalanches calculated by the derived equations are compared with the empirical data and the results of calculation using the existing methods.

*Vehicle, speed of an avalanche, pressure of an avalanche, friction coefficient, mass of the avalanche*

### ВВЕДЕНИЕ

Для оценки лавинной опасности и расчета параметров сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов необходимо знание динамических характеристик лавин.

Однако в настоящее время удовлетворительных физических моделей лавинного процесса, позволяющих адекватно описать движущуюся лавину, нет. Существующие математические модели основаны на идеальных математических или эмпирических представлениях, сильно упрощающих реальную картину и позволяющих описать лавинный процесс лишь с некоторой степенью приближенности [Казаков, 2011]. Например, принимаемые в лавинных расчетах значения коэффициентов турбулентного и кинетического трения [Казаков, 2011] являются эмпирическими, определяются на основе понятий, сформулированных в гидродинамике и гидрологии, и не вполне соответствуют динамике лавины (особенно лавины

сухого перекристаллизованного и смешанного снега). Таким образом, на сегодняшний день рассчитываемые значения скорости лавин не вполне соответствуют реальным и могут приниматься лишь как оценочные [Казаков и др., 2012].

По этим причинам значения динамических характеристик лавин, рассчитанные по существующим моделям, сильно отличаются от фактических [Боброва, 2011; Казакова, 2011].

Для разработки методов расчета скорости лавины и ее давления на препятствие необходим большой статистический массив данных натуральных наблюдений. Однако ввиду сложности измерения динамических характеристик лавин имеющихся экспериментальных данных и результатов наблюдений недостаточно. Этот пробел можно восполнить, используя известные реальные случаи взаимодействия лавин с транспортными средствами и т. п. Таких данных накоплено немало. Так, за пери-

од 1946–2011 гг. на о. Сахалине зарегистрировано 67 случаев попадания в лавины авто- и железнодорожных транспортных средств.

Изучение каждого отдельного случая взаимодействия лавины с объектом, параметры которого известны, может дать ценнейшую информацию о динамических характеристиках лавины, которые нельзя оценить только по исследованию лавинных отложений. К таким характеристикам относятся давление лавины на препятствие, масса лавинного тела, взаимодействующего с объектом, скорость движения попавшего в лавину объекта, трение этого тела о снег, скорость лавины в момент столкновения (мгновенная скорость).

Все рассчитанные характеристики дают представление об энергии и силе лавины, позволяют оценивать потенциал лавин, имеющих сходные морфологические, морфометрические и динамические параметры, и могут быть использованы в изыскательских работах при проектировании и строительстве объектов и сооружений в конкретной и схожей по рельефу и снегонакоплению местности.

Главной целью настоящей работы является демонстрация возможности использования попавших в лавину тел для изучения лавинных процессов. На основе простейшей модели материальной точки показано, как использовать информацию очевидцев и данные о перемещении тел лавиной для оценки параметров лавины.

## РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАВИНЫ И ТРАКТОРА

### Начальные условия и предпосылки

В.И. Окопный 25.12.1990 г. наблюдал сход лавины сухого снега из лавиносбора № 201 на автолесовозной дороге с. Ясное–Чамгинский перевал–пос. Загорный в бассейне р. Чамга (о. Саха-

лин, Восточно-Сахалинские горы) [Казаков и др., 2011]. Лавина захватила бульдозер ДТ-70 массой 17 т, перевернула его и всего за 5 с переместила на 12 м до противоположного берега реки.

Характеристика лавиносбора:

- площадь 9 га;
- морфологический тип – лотковый;
- абсолютная высота зоны отрыва лавины 660 м, границы зоны аккумуляции 260 м, превышение – 400 м;

– экспозиция юго-восточная;

– средний уклон 32°.

Характеристика лавины:

– смешанный генетический класс – свежеснежный и перекристаллизованный снег;

– высота фронта 20 м;

– объем 8000 м<sup>3</sup>.

Перемещение трактора произошло на горизонтальном участке (рис. 1–4).

Зная массу, размеры и форму транспортного средства, перемещенного лавиной, а также расстояние, на которое оно было перемещено, и время его движения, используя модель движения материальной точки, широко применяемую в практике лавиноведения для расчета скорости и дальности выброса лавины [Козик, 1962], можно определить векторы сил, направленных на работу по перемещению транспортного средства и рассчитать давление лавины на объект.

Представим лавину как тело постоянного объема, которое двигаясь вниз по лавиносбору с трением о поверхность старого снега, врежется в другое тело (трактор). Учитывая, что трактор при движении в лавине также испытывает трение о снег, можно рассчитать минимальное давление лавины, необходимое для того, чтобы его сдвинуть, и скорость лавины в момент ее столкновения с трактором.

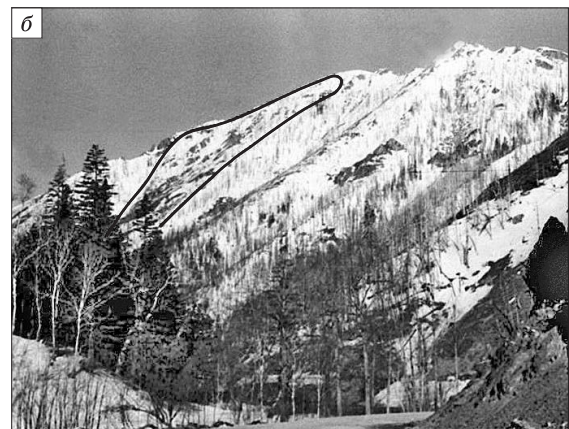


Рис. 1. Зона аккумуляции (а) и зона отрыва (б) лавины. Фото В.И. Окопного.

Жирной линией показаны границы зон.

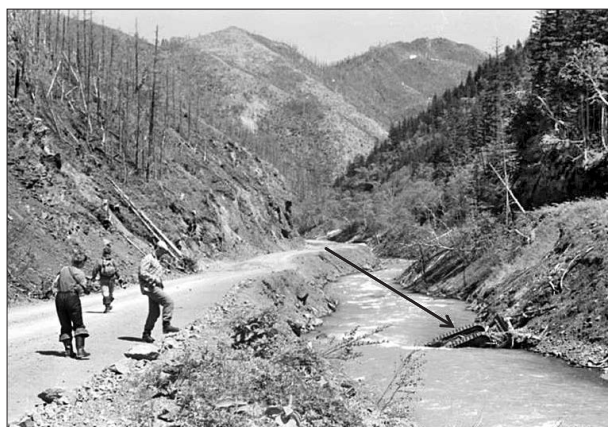


Рис. 2. Сбитый лавиной сухого снега трактор в реке (указан стрелкой). Фото В.И. Окопного.

Однако воздействие лавины на трактор было не одномоментным, а происходило в течение всего времени движения лавины, когда лавинное тело обтекало его.

По сведениям очевидца, трактор начал движение сразу после удара фронтальной части лавины и дальше двигался вместе с лавиной. Поэтому можно допустить, что фронтальная часть лавины, подобно блоку, ударила в трактор, переместив его.

**Определение скорости и массы лавины.** Для расчета скорости лавины мы использовали модель лавины как материальной точки.

Представим лавину как однородное тело массой  $m_l$ ,двигающееся по склону с ускорением  $a_l$ , испытывая трение о снег.

Разобьем движение лавины на два этапа: первый – движение лавины по склону (до момента столкновения с трактором), второй – движение лавины и трактора сразу после столкновения.

Рассмотрим первый этап. Выразим скорость лавины в момент ее столкновения с трактором:

$$v_l = \sqrt{2gS_1(\sin \alpha - \mu_l \cos \alpha)}, \quad (1)$$

где  $v_l$  – мгновенная скорость лавины в момент ее столкновения с трактором, м/с;  $\mu_l$  – коэффициент трения лавины о снег;  $S_1$  – расстояние от линии отрыва лавины до места ее столкновения с трактором, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – средний уклон лавиносбора от линии отрыва лавины до подножия склона, град. Коэффициент  $\mu_l$  принят равным 0,02 (коэффициент трения скольжения, рассчитанный для трения снега о снег).

Для расчета использовался средний уклон лавиносбора. Как правило, продольные профили лавиносборов имеют непрямолинейную (изви-

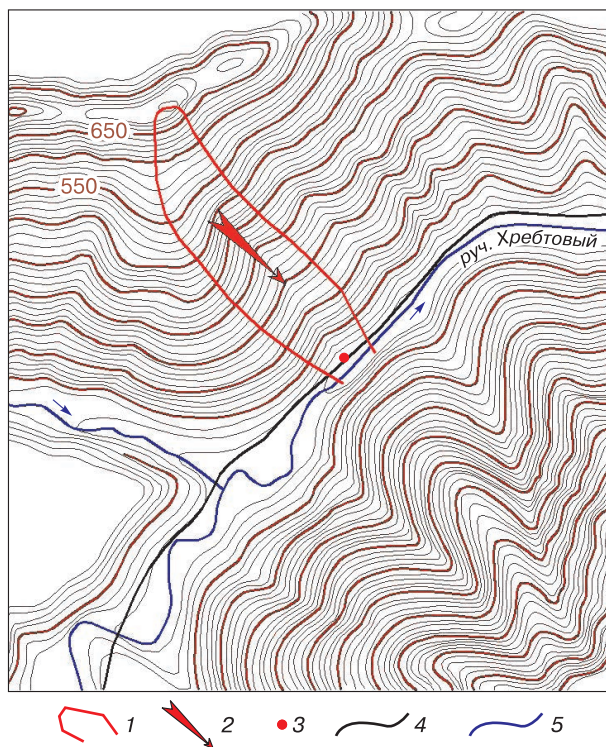


Рис. 3. Схема лавиноопасного участка, на котором при сходе лавины был сбит трактор.

1 – граница лавиносбора; 2 – направление движения лавины; 3 – местоположение трактора до столкновения; 4 – автодорога; 5 – водоток.

листую) форму, а их уклоны изменяются на протяжении пути движения лавины. Однако продольный профиль лавиносбора № 201 на всем протяжении имеет равномерный уклон и прямолинеен. Кроме того, лавина двигалась по старому снегу, который нивелирует поверхность лавиносбора. Поэтому вполне допустимо предположить, что при условии постоянного трения лавина на участке выполаживания склона начинала двигаться равнозамедленно.

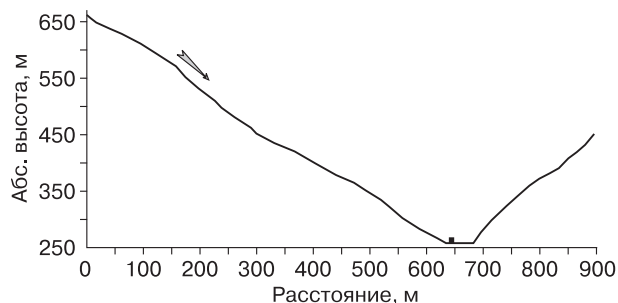


Рис. 4. Продольный профиль лавиносбора.

Стрелкой показано направление движения лавины; квадратом – местоположение трактора до столкновения.

Рассчитанное по этой формуле значение скорости лавины составляет 86,6 м/с, что соотносится с расчетным показателем скорости этой лавины, определенной по методике, основанной на гидравлической модели движения лавин [Handbook..., 1981].

Лавина перенесла трактор на расстояние 12 м. Будем считать, что на протяжении всего пути движения трактора в лавине та часть лавины, которая взаимодействовала с ним, имела скорость, сопоставимую со скоростью трактора.

Применяя закон сохранения импульса, выразим скорость лавины и трактора сразу после столкновения:

$$v_2 = \frac{m_{\text{л}} \sqrt{2gS_1(\sin\alpha - \mu_{\text{л}} \cos\alpha)}}{m_{\text{л}} + m_{\text{тр}}}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{л}}$  – масса взаимодействующей с трактором части лавины, кг;  $m_{\text{тр}}$  – масса трактора, кг.

Рассмотрим второй этап – движение лавины и трактора сразу после столкновения.

Массу системы представим как  $m = m_{\text{л}} + m_{\text{тр}}$ . Коэффициент трения системы  $\mu_{\text{л}}$  примем равным коэффициенту трения трактора о снег. После остановки трактора конечная скорость системы  $v_{2\text{к}} = 0$ .

Записав второй закон Ньютона для системы “лавина–трактор” в проекциях на оси координат и выразив скорость этой системы через формулу пути при условии, что система двигалась равномерно, получим мгновенную скорость системы “лавина–трактор” после столкновения:

$$v_2 = \sqrt{2g\mu_{\text{тр}}S_2}, \quad (3)$$

где  $S_2$  – расстояние от точки столкновения лавины с трактором до точки остановки трактора.

Приравняв выражения (2) и (3), имеем

$$\frac{m_{\text{л}} \sqrt{2gS_1(\sin\alpha - \mu_{\text{л}} \cos\alpha)}}{m_{\text{л}} + m_{\text{тр}}} = \sqrt{2g\mu_{\text{тр}}S_2}. \quad (4)$$

Отсюда получаем формулу нахождения части массы лавины, взаимодействующей с трактором:

$$m_{\text{л}} = m_{\text{тр}} \left[ \sqrt{\frac{\mu_{\text{тр}}S_2}{S_1(\sin\alpha - \mu_{\text{л}} \cos\alpha)}} \right] \times \left[ 1 - \sqrt{\frac{\mu_{\text{тр}}S_2}{S_1(\sin\alpha - \mu_{\text{л}} \cos\alpha)}} \right]^{-1}. \quad (5)$$

В расчетной формуле (5) присутствуют коэффициенты трения лавины о снег и трения трактора о снег. Коэффициент трения лавины о подстилающую поверхность для различных типов поверхности определялся по рекомендациям, приведенным в [Handbook..., 1981].

**Определение коэффициента трения.** Необходимым условием решения поставленной задачи является определение коэффициентов трения лавины о снег и трения трактора о снег.

Запишем дифференциальное уравнение движения для определения коэффициента трения трактора о снег:

$$\frac{dv}{dt} = -g\mu \quad \text{или} \quad \frac{dS}{dt} = -g\mu t.$$

Путем интегрирования получим

$$\int dS = \int g\mu t dt. \quad (6)$$

Зная, что путь, пройденный трактором,  $S = 12$  м,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>, время движения трактора  $t$ , по наблюдению очевидца, составило около 5 с, получаем искомое значение коэффициента трения трактора о снег  $\mu = 0,096$ .

**Определение пикового давления лавины на препятствие.** Давление твердого тела выражается формулой

$$P = \frac{F}{S},$$

где  $S$  – площадь поверхности трактора, на которую оказывается воздействие;  $F$  – сила, с которой лавина давит на трактор.

Площадь поверхности трактора 12 м<sup>2</sup>. Сила, с которой лавина давит на трактор, определяется из решения задачи движения лавины вниз по наклонной плоскости:

$$F = F_{\text{тр}} = \mu_{\text{тр}}m_{\text{тр}}g.$$

Таким образом, формула расчета пикового давления лавины на трактор будет иметь вид

$$P = \frac{\mu_{\text{тр}}m_{\text{тр}}g}{S}.$$

Здесь коэффициент трения трактора о снег  $\mu_{\text{тр}} = 0,096$ ,  $m_{\text{тр}} = 17\,000$  кг,  $S = 12$  м.

Рассчитанное значение давления лавины на трактор составило 0,0013 МПа. Это минимальное давление лавины, необходимое для того, чтобы переместить трактор на 12 м.

## ВЫВОДЫ

Получены формулы для расчета массы взаимодействующей с объектом части лавины, скорости лавины до и после столкновения, коэффициента трения трактора о снег и пикового давления лавины на трактор. Рассчитанные по уравнениям значения характеристик лавины, сбившей трактор, приведены ниже.

– Мгновенная скорость лавины в момент ее столкновения с трактором 86,58 м/с.

– Мгновенная скорость системы “лавина–трактор” сразу после столкновения 3,53 м/с.

– Масса части лавины, взаимодействующей с трактором, 308,8 кг.

– Коэффициент трения трактора о снег 0,096.

– Пиковое давление лавины на трактор 1332,8 Па.

Расчетная скорость лавины в момент столкновения составляет 86,6 м/с. Механизмы, влияющие на динамические характеристики лавин, в частности на скорость, лежат в основе ряда моделей, описывающих многие склоновые гравитационные процессы [Божинский, 1987; Дюнин, 1987; Зюзин, 2006; Познанин, Геворкян, 2008; Боброва, 2011; Казакова, 2011]. Полученные по этим моделям скорости движения лавинного тела часто имеют и более высокие значения. Так, значение скорости, рассчитанное по гидравлической модели, составляет 89 м/с [Handbook..., 1981]. О высоких скоростях лавины свидетельствуют также данные наблюдений за лавинами (типичная скорость сухой лавины – 60 м/с, но есть сведения, что скорость такой лавины может достигать 100 м/с) [Божинский, 1987; Дюнин, 1987; Зюзин, 2006].

Из результатов расчетов следует, что для того, чтобы сбить и переместить на 12 м бульдозер массой 17 т, достаточно удара лавинного тела массой 308 кг при давлении 0,0013 МПа. При этом бульдозер сразу после удара начал двигаться со скоростью 3,5 м/с. Для расчета давления лавины использовался найденный по формуле (6) коэффициент трения трактора о снег, который составляет 0,096.

Формула (6) для расчета коэффициента трения перемещаемого лавиной объекта о сухой снег может применяться и в тех случаях, когда нет достаточного количества натуральных наблюдений за движением различных объектов в лавинах.

Таким образом, сведения о телах (объектах), сбитых лавинами, можно использовать при определении характеристик лавин. Однако заметим, что не для любых тел следует применять расчетные формулы. Это должны быть массивные и габаритные нестационарные объекты. Использование слишком легких или небольших по объему

тел, которые будут в любом случае захвачены и перенесены лавиной, неинформативно, так как рассчитанное давление будет слишком мало по сравнению с фактическим.

Авторы выражают благодарность В.И. Окопному за ценную информацию, использованную для расчета динамических характеристик лавины.

## Литература

- Боброва Д.А.** Расчетная и фактическая максимальная дальность выброса лавин // Геориск, 2011, № 4, с. 24–26.
- Божинский А.Н.** Основы лавиноведения / А.Н. Божинский, К.С. Лосев. Л., Гидрометеиздат, 1987, 280 с.
- Дюнин А.К.** Защита автомобильных дорог от лавин / А.К. Дюнин, Г.В. Бялобжеский, А.Г. Чесноков. М., Транспорт, 1987, 60 с.
- Зюзин Ю.Л.** Суровый лик Хибин / Ю.Л. Зюзин. Мурманск, Рекламная полиграфия, 2006, 225 с.
- Казаков Н.А.** Моделирование лавин разных генетических классов: проблемы и решения // Тезисы докл. IV Междунар. конф. “Лавины и смежные вопросы”. Кировск, Апатиты, Апатит-Медиа, 2011, с. 59–60.
- Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Казакова Е.Н.** Лавинные процессы в бассейне реки Мзымты и проблемы противолавинной защиты Олимпийских объектов в Красной Поляне // Геориск, 2012, № 2, с. 10–29.
- Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Окопный В.И.** Лавинные процессы на Чамгинском перевале (Восточно-Сахалинские горы) и опыт противолавинной защиты автомобильных дорог: к 30-летию образования Чамгинской снеголавинной экспедиции // Тезисы докл. IV Междунар. конф. “Лавины и смежные вопросы”. Кировск, Апатиты, Апатит-Медиа, 2011, с. 61–62.
- Казакова Е.Н.** Давление лавины на препятствие в низкогорье и высокогорье на примере Сахалина и Западного Кавказа // Геориск, 2011, № 4, с. 18–20.
- Козик С.М.** Расчет движения снежных лавин / С.М. Козик. Л., Гидрометеиздат, 1962, 74 с.
- Познанин В.Л., Геворкян С.Г.** Глиссирующий механизм формирования ледово-водокаменного селя при срыве ледника Колка в 2002 году // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 57–65.
- Handbook of snow** / Ed. by D.M. Gray, D.H. Male. Saskatoon, Canada, Pergamon PRESS Canada Ltd, 1981, 776 с.

Поступила в редакцию  
6 декабря 2012 г.