

Лавинный фронт как уединенная волна — солитон

Н.А. Казаков

Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2005 г.
Представлена членом редколлегии А.Н. Божинским*

Снежную лавину предлагается описывать как волновой пакет, на фронте которого формируется уединенная волна — солитон.

Введение

При описании лавинных процессов приходится сталкиваться с рядом феноменов, которые не получили достаточно убедительного объяснения в рамках классических представлений, сложившихся в гляциологии. Формирование волн при движении лавин — один из таких феноменов.

На сегодняшний день имеются все основания представлять геодинамические экзогенные процессы не как гидрологические или гравитационные явления, а как процессы более сложного характера. Мы полагаем, что достаточно хорошо они могут быть описаны в рамках синергетических представлений, суть которых сводится к следующему: в данной системе ни один отдельно взятый фактор не может привести к ожидаемому эффекту без воздействия других факторов, в результате чего возникает феномен самоорганизации упорядоченных структур в открытых диссипативных системах. Подавляющее большинство геологических систем соответствует определению синергетической системы [8].

Постановка задачи

Снежную лавину можно описать как нисходящую волну, движущуюся по лавиносбору в виде турбулентного потока и приводящую в движение снежную толщу в лавиносборе. Такая система удовлетворяет условиям возникновения диссипативных структур [2, 7, 13]: это открытая неравновесная система; протекающие в ней процессы нелинейны.

Представим первоначальный сдвиг снежного блока как импульс, который дает начало продольной волне сжатия, распространяющейся в снежной толще как перераспределение его плотности. Подобные явления наблюдаются в горных ледниках и на начальных стадиях движения оползней некоторых типов и грязекаменных селей и могут быть описаны как кинематическая волна. В этом отношении снежная толща в лавиносборе — не исключение из общих закономерностей для процессов в неустойчивых массивах рыхлообломочных пород, залегающих при уклонах более 15°.

Одновременно с первоначальным сдвигом снежного блока повышается давление на него со стороны залегающего выше по склону элемента объема δV снежной толщи, начинающей двигаться вниз по лавиносбору. Давление на снежный блок со стороны

этого элемента приводит к возникновению волны сжатия, распространяющейся в снежной толще как избыток массы. Образовавшаяся продольная волна (волна сжатия) способствует разрушению структурной связности снежной толщи, тем самым, упрощая возможность ее вовлечения в лавинный процесс.

Движущийся элемент объема снежного пласта δV начинает формировать фронт лавины, который может быть описан как поперечная волна. Скорость роста, размеры и форма такой волны определяются диссипативными процессами в ее подошве. Форма и время существования волны зависят от реологических свойств снежной толщи, обуславливающих изменение баланса скоростей в подошве и на гребне волны. Волна начинает разрушаться либо вследствие расплывания при $U_1 > U_2$, либо вследствие обрушения гребня $U_1 < U_2$, где U_1 — скорость подошвы волны, U_2 — скорость ее гребня.

Саму волну можно рассматривать как фронт возбуждения активной среды — снежной толщи — и представить как пространственно-временную периодическую структуру. Математически такая волна может быть описана как уединенная волна — солитон.

При движении лавины первая волна вследствие диссипативных процессов как избыток массы должна распадаться на серию волн — волновой пакет. Дисперсия волнового пакета в нелинейной среде — снежной лавине — должна приводить к возникновению нелинейных волн и их самоорганизации в периодические пространственно-временные структуры, визуально наблюдаемые как волновой цуг. В этом случае периодическую структуру лавины можно описать как цуг периодических волн, на фронте которого формируется уединенная волна — кинк.

Такое утверждение позволило сделать анализ лавин сухого снега. Формы пиков на графиках распределения толщины лавинного тела, форма и характер движения фронта лавины соответствуют описаниям солитонов. В пользу приведенной точки зрения свидетельствуют кратковременность движения лавин, сохранение его высокой скорости при малых уклонах зоны их транзита и волнообразный (пульсирующий) характер движения лавины.

В целом лавина может быть описана в рамках солитонной модели движения лавины и селевого потока [4, 5, 15, 16].

Решение

Определим условия, необходимые для описания движения лавинной волны в рамках предлагаемой модели. Среда, в которой формируется и движется лавина — снежная толща с разрушенной структурной связностью. Для описания движения уединенной волны в рамках классической теории солитонов представим снежную толщу в лавиносборе как квазизжидкую сжимаемую среду, в которой образуется уединенная волна.

Дальнейшее развитие лавинного процесса можно представить в следующем виде. Вслед за продольной волной, движущейся в снежной толще, в лавиносборе формируется собственно лавина — поперечная волна, движущаяся вдоль лавиносбора и распадающаяся на последовательность солитонов в соответствии с эволюцией решения уравнения Кортевега-де Фриза (КдФ) в нелинейной среде [4, 5, 7, 11, 12, 15, 17]:

$$\eta(x, t) = \eta_m / \text{ch}^2 \{ \sqrt{3\eta_m / 4h} [\sqrt{g(h + \eta_m)} t] \}, \quad (1)$$

где h — толщина снежного пласта, η — высота фронта лавины (амплитуда солитона) в момент времени t , η_m — максимальная высота фронта лавины (амплитуда солитона), t — время от начала движения лавины, x — длина пути лавины на момент времени t , g — ускорение свободного падения, ch — гиперболический косинус.

Можно предположить, что в системе “снежная толща в лавиносборе” возникают два цуга периодических волн: продольный и поперечный. Первый движется в снежной толще и визуально не наблюдается. Отмечаются только его побочные эффекты: разрушение строений, перемещение крупных глыб горной породы и т.д. до подхода фронта лавины. Такие эффекты описаны в литературе [14]. Второй волновой цуг — поперечная волна — представляет собой собственно лавину. Временной интервал между двумя цугами волн, вероятно, не превышает нескольких десятков секунд.

При сужении лавинного русла возможна трансформация лавины в ударную волну типа бора. При этом высота фронта лавины и ее скорость должны резко возрастать в соответствии с выражением [2, 4, 5, 15]:

$$U_2 = \sqrt{g\eta_1(\eta_1 + \eta_2) / 2h}, \\ U_1 > U_2 = \sqrt{gh_2},$$

где U_1 — скорость фронта лавины, U_2 — скорость бора, η_1 — высота фронта лавины, η_2 — высота бора.

Вследствие резкого увеличения коррелирующей способности лавины должна резко возрастать его насыщенность твердой составляющей (ледяные кристаллы) за счет вовлечения в лавинный поток снега с бортов и днища лавиносбора, что в свою очередь должно приводить к увеличению плотности лавинного тела. Сформировавшаяся структура может сохраняться в течение всего времени существования лавины. Образование подобных структур возможно при достаточно высоких скоростях лавинного потока.

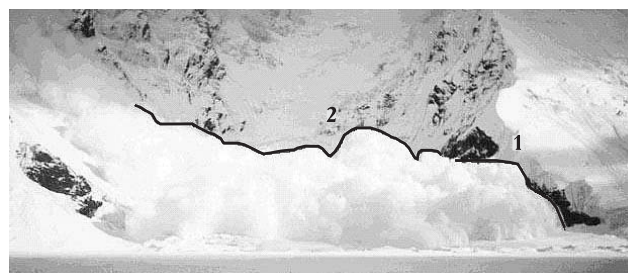


Рис. 1. Пространственно-временная периодическая структура движущейся лавины: кинк (1), солитон (2) и волновой пакет в хвостовой части лавины

Fig. 1. Spatial and temporal structure of avalanche: kink (1), solitary wave (2) and wave packet in the avalanche

На развитой стадии процесса лавину можно представить состоящей из двух частей: головная часть (фронт) — солитон (кинк), хвостовая — периодическая волна (рис. 1). Найдем дополнительное условие, определяющее периодическое решение для хвостовой части лавины [2, 4, 5]:

$$D = U + \sqrt{g\eta_1},$$

где D — групповая скорость волнового пакета.

Фронт лавины любого типа, движущейся по лавинному лотку, представляет собой все тот же бор (кинк) и может быть описан однокинковым решением уравнения синус-Гордона [13]:

$$U = 4 \arctg \exp(2\eta x + \frac{1}{2\eta} t + x_0).$$

Причиной возникновения как периодической, так и уединенной волны служит развитие случайных возмущений в пространственно-однородном потоке — снежной лавине. При определенных условиях возможно формирование уединенной электромагнитной волны — солитона, распространяющейся в активной среде — однородном снежном слое (диэлектрическом волноводе [3]) и приводящем к разрушению его пространственно-неоднородной структуры. Процесс должен сопровождаться высвобождением энергии связи между кристаллами, которая будет вносить существенный вклад в энергию лавины. Условия, необходимые для формирования такой волны, — наличие в снежной толще гомогенного слоя, выполненного ледяными кристаллами полускелетного или скелетного класса форм.

Результаты

Сформировавшийся солитон движется, практически не испытывая сопротивления среды. Дальность пробега такой лавины может ограничиваться лишь протяженностью гомогенной снежной толщи или участками лавиносбора, на которых лавинный лоток резко расширяется. На этих участках фронт лавины начинает расплываться вследствие увеличения его ширины. Подобный характер движения лавин автор наблюдал в троговых долинах Хибин.

Данные по лавинам позволяют рассматривать волновой характер их движения как имманентную

характеристику. Такое утверждение представляется справедливым по крайней мере для лавин сухого снега. Характеристики волн обусловлены морфометрическими параметрами зоны транзита лавиносбора (уклонами днища) и стадией метаморфизма снежной толщи, залегающей в лавиносборе.

Наблюдения за лавинами, проведенные нами в 1979–2005 гг. в Хибинах, на Сахалине и Курильских островах, дают основание сделать вывод, что дальность выброса и скорость лавины не допустимо рассчитывать только по морфометрическим характеристикам лавиносбора и объемам лавин, поскольку параметры существенно зависят от степени перекристаллизации снежной толщи: т.е. степени ее упорядоченности.

Во все применяемые в изыскательской практике расчетные модели энергии, скорости и дальности выброса лавины входят только морфометрические параметры лавиносборов и масса снежного пласта в нем. Сама лавина рассматривается либо как материальная точка, либо как гидравлический поток. При этом в существующих методиках расчета дальности выброса и скорости лавин не учитывается степень метаморфизма снежной толщи во время схода лавины и соответственно вклад, который вносит в суммарную энергию лавины внутренняя энергия снежного пласта: энергия связи между ледяными кристаллами, высвобождающаяся при его разрушении. Вклад такой энергии в энергию лавины значителен — особенно для лавин трансформации снежной толщи.

Обсуждение результатов

В большинстве существующих методик расчета скорости и высоты фронта лавины [1, 9, 10] характеристики метаморфизированной снежной толщи и волновой характер движения лавин не учтены, что приводит к ощутимому занижению реальной дальности выброса лавин генетического класса трансформации снежной толщи. Так, расчеты предельной дальности выброса и скорости лавин по обычно используемой в практике методике В.П. Благовещенского [9], по нашим наблюдениям на Сахалине и Курилах в 1979–2005 гг. занижает реальную дальность выброса лавин на 30–50%. Дальность выброса катастрофических лавин, наиболее близкую к реальной, позволяет получить методика С.М. Козика [6]. Она завышает реальную дальность выброса лавин генетических классов нового снега и весеннего снеготаяния, но дает возможность достаточно хорошо определять характеристики лавин трансформации снежной толщи, которые наиболее опасны для населения, социальных объектов и сооружений в силу их высокой скорости, энергии и трудности прогнозирования. Это подтверждают данные полевых наблюдений, проводившихся нами на о. Сахалине, Курильских островах, в Хибинах и в Забайкалье в 1978–2005 гг.

Дальность выброса сухой лавины класса трансформации снежной толщи, сошедшей в апреле 1993 г. в Восточно-Сахалинских горах (Чамгинский перевал), составила 1300 м при объеме всего 20 тыс. м³, причем

половину пути (около 600 м) лавина двигалась при уклонах 3–5°. Обычная дальность выброса лавин такого объема в описываемом районе не превышает 600 м, т.е. по классическим моделям движения лавин указанная цифра не может быть получена. Дальность выброса рассматриваемой лавины, рассчитанная по методике В.П. Благовещенского [9], составляет 700 м, а по методике С.М. Козика [6] — 1100 м. Дальность выброса такой же лавины, сошедшей с основного склона относительной высотой 70 м и крутизной в зоне отрыва 35° (г. Шахтерск, 28 января 1989 г.) оказалась равна 190 м при объеме 1500 м³. Дальность выброса этой лавины, вычисленная по методике В.П. Благовещенского, составляет 85 м.

Формирование лавин с аномальной дальностью выброса, трудно объяснимыми траекториями и пр. наблюдалось неоднократно (см., например, [14]). Все эти случаи хорошо описываются в рамках солитонной модели движения лавины. Лавины нового снега и весеннего снеготаяния, как правило, движутся в соответствии с классическими представлениями о динамике лавин [1, 10].

Волновой характер движения лавин не учитывается и при оценке характера их воздействия на сооружения. Между тем цуг периодических волн оказывает на сооружение многократное воздействие, способное вызвать резонансные явления в конструкциях, приводящие к их повреждению. Таким образом, расчет воздействия лавины на сооружение как разового давления сплошного тела в ряде случаев приводит к занижению степени лавинной опасности для объектов и сооружений.

При резком торможении лавины о препятствие естественного или искусственного происхождения (противолавинная или иная дамба и т.д.), расположенное на ее пути, может произойти отрыв снеговоздушного облака от лавинного тела, что сопровождается резким увеличением скорости и дальности выброса воздушной волны лавины. Тогда дальность действия лавин может превышать значения, рассчитанные по рекомендуемым формулам [1, 9, 10]. Такие случаи автор наблюдал в Хибинах и на Сахалине.

Выводы

1. Волновой характер движения снежных лавин практически всех генетических и морфологических типов служит их имманентной характеристикой и обусловлен развитием диссипативных процессов в лавинном потоке.

2. Снежную лавину следует рассматривать не как объект, а как стадию его состояния (фазу развития процесса), в качестве которого должна выступать литологическая компонента лавинного комплекса: снежная толща в лавиносборе.

3. Лавинный процесс можно представить как последовательную самоорганизацию пространственно-неоднородных структур снежного слоя, временных периодических структур снежного пласта и пе-

риодических пространственно-временных структур движущейся лавины.

4. Дальность выброса и скорость лавины не допустимо рассчитывать на основе только морфометрических параметров лавиносбора и объема снежного пласта в нем: они в значительной степени определяются волновым характером движения лавины.

5. Вследствие волнового характера движения лавины дальность ее выброса может не зависеть от объема лавины, заложения и уклона лавинсбора. По этой причине при оценке степени лавинной опасности для объектов и сооружений в расчетах необходимо использовать значения дальности и выброса катастрофических лавин, поскольку реальная повторяемость таких явлений должна быть выше, чем рассчитанная традиционными методами.

6. При оценке воздействия, оказываемого на инженерные сооружения лавинами трансформации снежной толщи, следует учитывать не однократное давление фронта лавины, а многократное (пульсирующее) давление серии волн волнового пакета, т.е. при расчетах вводить количество волн и их частоту в волновом пакете для оценки вероятности возникновения резонанса в конструкциях.

7. Образование периодических структур и формирование солитонов широко распространены в природе и при определенных условиях характерны для динамических стадий состояния многих геодинимических процессов, таких как снежные лавины, гляциальные прорывные сели и селевые потоки иного генезиса, водоснежные потоки, дождевые паводки на горных реках, пульсирующие ледники, некоторые типы оползней и т.д. Эти явления можно выделить в отдельный класс, объединяющий геосистемы различного генезиса на основе признака, общего для таких систем — самоорганизации периодических пространственно-временных структур на динамической стадии их развития и развивающихся по одним и тем же инвариантам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. Л., ГИМИЗ, 1987, 280 с.
2. Дородницын В.А., Еленин Г.Г. Симметрия нелинейных явлений. — Компьютеры и нелинейные явления. М., “Наука”, 1988, с. 123-191.
3. Казаков Н.А. Электродинамика снежной толщи, образование и движение лавин. — МГИ, вып. 82, 1997, с. 161-164.
4. Казаков Н.А. Самоорганизация упорядоченных структур и возникновение солитонов при экзогенных природных процессах. — Учен. зап. Сахалинского гос. ун-та, вып. 1, 2000, с. 116-125.
5. Казаков Н.А. Волновая динамика селей. Геоэколо-

- гия. — Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 2. М., 2001, с. 158-164.
6. Козик С.М. Расчет движения снежных лавин. Л., ГИМИЗ, 1962, 74 с.
 7. Кулаков А.В., Румянцев А.А. Введение в физику нелинейных процессов. М., “Наука”, 1992, 159 с.
 8. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск, “Наука”, 1992, 229 с.
 9. Методические разработки крупномасштабной оценки лавинной опасности. М., Изд-во МГУ, 1986, 122 с.
 10. Москалев Ю.Д. Динамика снежных лавин и снеголавинные расчеты. Л., ГИМИЗ, 1977, 232 с.
 11. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. М., “Наука”, 1990, 286 с.
 12. Ablowitz M., Segur H. Solitons and the inverse scattering transform. SIAM Philadelphia, 1981, 387 p.
 13. Ebeling W. Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Teubner, 1976, 194 p.
 14. Flaig W. Lavinien. Leipzig, 1936.
 15. Kazakov N., Minervin I. Mechanism of formation the debris — flow waves in coherent debris flows generation by rain. — Proc. of the Second Intern. Confer. “Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment”. Rotterdam, Balkema, 2000, p. 397-402.
 16. Kazakov N., Minervin I. The avalanche front movement as solitary wave — soliton. — Proc of the Second Intern Confer “Avalanches and Related Subjects”. Kirovsk, 2001, с. 39-40.
 17. Newell A. Solitons in mathematics and physics. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1985, 244 p.

SUMMARY

Snow cover in avalanche catchments and avalanche is rightful to regard not as a separate objects, but as a lithological component of the natural mudflow complex. During its development the system passes the cycle of forming dissipative structures of different types. Formation of waves under the avalanche movement is proposed to regard as a process of selforganization of spatial-temporal periodical structures. Such structures can be described as a waved tandem, and avalanche front as a solitary wave. Wave formation under the avalanche movement is their immanent characteristic. Parameters of such waves can be calculated with the help of Cortevég-de Vris and sine-Gordon equation. Proposed approach permits to describe the development processes of many exogenic systems: snow avalanches, glacial out-break mudflows and mudflows of another genesis, rain flows on mountain rivers, surging glaciers, some types of landslides. All these phenomena devote to a united class of natural phenomena.