

ЭВОЛЮЦИЯ СЕЛЕВОЙ ГЕОСИСТЕМЫ КАК ПРОЦЕСС САМООРГАНИЗАЦИИ УПОРЯДОЧЕННЫХ СТРУКТУР

Evolution Of The Debris-Flow Geosystem As Process Of Self-Organization Of The Ordered Structures

КАЗАКОВ Н.А.

Директор, заведующий Лабораторией лавинных и селевых процессов ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (Сахалинский филиал), доцент, к.г.-м.н., kazakovna@fegi.ru

KAZAKOV N.A.

Head of Laboratory of Avalanche & Debris-Flow Processes Research at the Far East Geological Institute of Far East Branch of Russian Academy of Sciences (Sakhalin Department), Ph.D., Associate professor, kazakovna@fegi.ru

Ключевые слова: селя, селевой процесс, селевая геосистема, самоорганизация упорядоченных структур.

Аннотация: эволюция селевой геосистемы представляет собой непрерывный процесс самоорганизации упорядоченных структур. Селевой процесс как процесс самоорганизации упорядоченных структур можно описать как последовательность автономных стадий самоорганизации системы, благодаря чему система переходит в одно из многих допустимых равновероятных состояний. Финальным состоянием эволюционирующей физической системы является прекращение ее эволюции при переходе в статическую фазу (формирование селевых отложений), достигаемое через прохождение системы через состояние динамического хаоса (селя). Эволюцию селевой геосистемы (триггерной геосистемы) можно представить как непрерывную смену равновесных и неустойчивых состояний.

Key words: debris-flows, debris-flow process, debris-flow geosystems, self-organization of ordered structures.

Abstract: a debris-flow geosystems include: a debris-flow basin, a potential debris flow massif (a massif of detrital loose rocks in debris-flow basin), debris-flow and a debris-flow deposits. It is the nonlinear system with the chaotic conduct. A debris-flow geosystem can be described as dissipative system in which consistently there is a self-organization of ordered structures: a spatially inhomogeneous structure (represented in the structure of a potential debris-flow massive), after — a temporal periodic structure (auto waves of potential debris-flow massive represented by the system) and then — a space-temporal periodic (a debris-flow).

Введение

При изучении селевых процессов исследователь сталкивается с рядом феноменов, не получивших достаточно убедительного объяснения в рамках классических представлений, сложившихся в инженерной геологии и гидрологии: например, с феноменом возникновения селевых волн, который

нельзя объяснить только заторможенным характером движения селя.

Селевой процесс (формирование в селевом очаге массива рыхлообломочных пород, движение селя, аккумуляция селевых отложений) необходимо рассматривать не как гидрологический или гравитационный процесс, но как явление более сложного характера.

Селевые геосистемы удовлетворяют условиям возникновения диссипативных структур [4, 7, 8, 10]: являются открытыми неравновесными системами; селевые процессы нелинейны. Как нелинейные системы с хаотическим поведением, содержащие неограниченно большое число элементов (подсистем), селевые геосистемы можно описывать как самоорганизующиеся системы, в которых последовательно происходит самоорганизация упорядоченных структур.

Постановка задачи

Селевой процесс можно описать как детерминированный упорядоченно-стохастический процесс, которому присуща внутренняя связь и непрерывность. Области существования диссипативных структур в литологической компоненте селевой геосистемы и границы их устойчивости математически могут быть описаны как странные аттракторы методами теории катастроф [1].

Сель необходимо описывать как динамическую фазу процесса эволюции литологического комплекса геосистемы. В селевой геосистеме можно выделить статическую компоненту, отображаемую в ее геоморфологическом строении (селевой бассейн), и динамическую компоненту, отображаемую в литологическом комплексе.

Самоорганизация упорядоченных структур в селевой геосистеме

Потенциальный селевой массив (ПСМ) — толща коллювиальных, коллювиально-делювиальных, делювиальных пород в селевом очаге, формирующаяся на склонах крутизной более 15° в результате гидрометеорологических и геологических процессов — находится в неравновесном состоянии и при определенных условиях переходит в движение, формируя турбулентный поток.

В ходе эволюции системы в ней последовательно происходит самоорганизация диссипативных структур: пространственно-неоднородных (отображаемых в структуре ПСМ); временных периодических (отображаемых в системе автоволн ПСМ); про-



Рис. 1. Самоорганизация упорядоченных структур в ходе эволюции селевой геосистемы

странственно-временных периодических (сель). Каждая стадия развития подсистемы «Литологическая компонента» описывается как подсистемный уровень в триггерной геосистеме, а смена стадий — как фазовые переходы с одного подсистемного уровня на другой.

Традиционно сель и ПСМ описываются как разные объекты, однако их правомерно описывать как разные стадии эволюции одного и того же объекта.

Тогда сель можно описать как динамическую фазу эволюции литологической компоненты селевой геосистемы при переходе ее из неравновесного состояния в статическое. Таким образом, формирование ПСМ, возникновение, движение и разгрузку селя мы можем представить как разные фазы единого непрерывного процесса эволюции литологической компоненты селевой геосистемы при переходе ее из неустойчивого состояния в устойчивое.

При переходе системы из неупорядоченного (хаотического) состояния в упорядоченное и вновь в хаотическое происходит самоорганизация упорядоченных структур (рис. 1).

На разных фазах эволюции системы возникают упорядоченные структуры разных типов (см. таблицу).

1) Равновесная фаза: формирование ПСМ в селевом очаге при геологических и гидротектологических процессах.

2) Неравновесная фаза: прохождение литологической компонентой цикла метаморфических преобразований вследствие морфогенеза слагающих ее рыхлообломочных пород; в результате взаимодействия гравитационных и метаморфических процессов формируются упорядоченные *пространственно-неоднородные структуры*: литологическая компонента переходит в триггерное состояние, трансформируясь в сель при внешнем воздействии.

1. *Неравновесная фаза развития литологической компоненты. Пространственно-неоднородная структура снежного ПСМ* образована кластерами элементов минерального скелета ПСМ и системой пор и отображается в их текстуре (рис. 2).

Количественно текстуру ПСМ можно описать как пространственно-неоднородную упорядоченную структуру, образованную вертикальными элементами текстуры — кластерами элементов минерального скелета (кластерами глинистых агрегатов и крупнообломочных пород ПСМ), имеющими дендритовую текстуру (см. рис. 2). Формирование кластеров обуславливается электростатическими силами.

В ходе эволюции системы хаотическая ориентировка кластеров в глинистых мелкоземках и в крупнообломочной составляющей ПСМ становится преимущественно вертикальной.

Степень упорядоченности ПСМ, отображаемую в их текстуре на разных стадиях эволюции, опишем, используя синергетический подход к описанию сложных систем. Эволюция селевой геосистемы является негэнтропийным процессом.

Вследствие стохастичности внешних факторов цикл метаморфических преобразований структуры элементов минерального скелета ПСМ отличается достаточной вариабельностью. Однако совокупность вероятных состояний ПСМ (фазовая траектория системы) в достаточной степени детерминирована и может описываться как странный аттрактор.

Детерминированность вероятных состояний системы позволяет математически описать текстуру через понятие фрактальной размерности. Обломки пород и глинистые агрегаты в кластерах соединяются вершинами и ребрами, на которых максимальны напряжение электрического поля и концентрация водяного пара; термодинамически эти зоны неустойчивы. На ребрах кристаллов и боковых гранях элементы структуры I, II и III порядков соединяются между собой, образуя пространственную решетку (см. рис. 2), которую можно описать как детерминированный фрактал [9].

К неравновесной фазе эволюции литологическая компонента селевой геосистемы переходит при возникновении упорядоченной пространственно-неоднородной структуры ПСМ, образованной вертикальными элементами текстуры (кластерами минеральных частиц) и системой пор.

Процесс, ведущий к образованию такой структуры, направлен на переход системы из хаотического состояния в упорядоченное и приводит к изменению ее физических характеристик. При этом уровень пространственной организации ПСМ (структура) выступает в роли параметра, определяющего степень его устойчивости к внешнему воздействию: как параметр, обуславливающий существование единого информационного поля внутри ПСМ. ПСМ с упорядоченной структурой обладает большой потенциальной энергией — энергией связи между элементами минерального скелета, которая высвобождается при разрушении этих связей и должна учитываться при расчетах динамических характеристик селей.

2. *Неравновесная фаза развития литологической компоненты.* В ПСМ возбуждаются свободные колебания, представленные системой изгибных волн.

После самоорганизации пространственно-неоднородной структуры возможна самоорганизация временной периодической структуры ПСМ: как следствие его механических нелинейных автоколебаний [3]. Структура представлена системой стоячих поперечных волн, узлы и пучности которых занимают в селевом очаге определенное положение.

Дилатансия на участках перегибов тальвега селевого очага приводит к разрушению связности ПСМ и формированию селя. Частота, амплитуда и интенсивность колебаний ПСМ определяются сложным кооперативным взаимодействием разных процессов, происходящих в ПСМ и ведущих к его стабилизации или дестабилизации. Линейные размеры системы — десятки и сотни метров — определяют диапазон частот: от десятых долей до первых герц: область инфранизких частот.

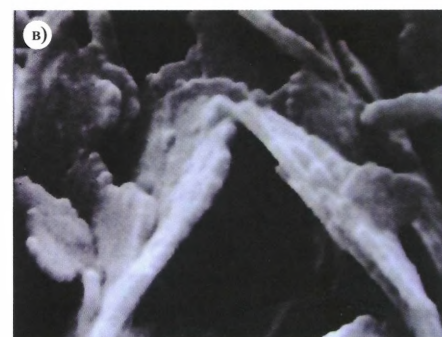
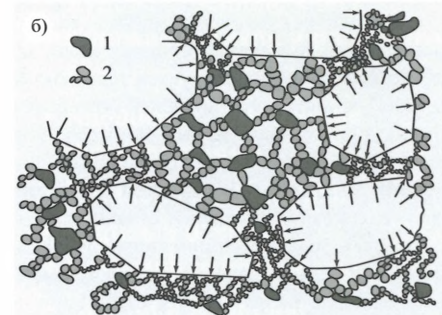


Рис. 2. Пространственно-неоднородная упорядоченная структура ПСМ накопления (а — структура крупнообломочной фракции, о. Сахалин; структура мелкозема ПСМ: б — структура глины, Цитович, 1983; в — вертикальный элемент текстуры — кластер глинистых агрегатов, Осипов, Соколов, 2012)

3. *Динамическая фаза развития литологической компоненты.* Формируется и движется сель: поток (квазипоток), в котором происходит самоорганизация периодической пространственно-временной структуры, отображаемой как цуг периодических (аперриодических) волн.

Процессы внутри селя описываются как динамический хаос. Фронт селя можно описать как поперечную волну, скорость роста, размеры и форма которой определяются диссипативными процессами в ее подошве. Форма и время существования волны зависят от реологических свойств ПСМ, обуславливающих изменение баланса скоростей в подошве и на гребне волны.

Волна разрушается 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 (рис. 3). Волну можно описать как *пространственно-временную периодиче-*

скую структуру. Математически волна описывается как уединенная волна: солитон [2, 11].

Вследствие диссипативных процессов как избыток массы волна должна распадаться на серию волн — волновой пакет, дисперсия которого в нелинейной среде — селе — должна приводить к возникновению нелинейных волн и их самоорганизации в периодические пространственно-временные структуры, визуально наблюдаемые как волновой цуг.

Периодическую структуру селя можно описать как цуг периодических волн, на фронте которого формируется уединенная волна — кинк. Описания селей позволяют принять это утверждение. Формы пиков на графиках распределения толщины селевого тела, форма и характер движения фронта селя соответствуют описаниям солитонов. Среда, в которой формируется и движется сель, — массив рыхлообломочных пород с разрушенной структурной связностью.

4. Фаза вырождения системы (статическая). После остановки селя и аккумуляции отложений геосистема переходит в статическое состояние: ее эволюция завершается.

Таким образом, эволюцию селевой геосистемы мы можем описать как непрерывный процесс самоорганизации упорядоченных структур, а саму селевую геосистему как триггерную геосистему (рис. 4).

Такое представление о селевой геосистеме открывает новые возможности прогнозирования селевых процессов.

Заключение

Эволюция селевой геосистемы представляет собой непрерывный процесс самоорганизации упорядоченных структур.

Каждую стадию эволюции геосистемы можно описать как подсистемный уровень в триггерной геосистеме, а смену состояний системы, обусловленную физическими процессами, происходящими внутри системы, — как фазовые переходы с одного подсистемного уровня на другой.

Селевой процесс как процесс самоорганизации упорядоченных структур представляет собой последовательность автономных стадий самоорганизации системы, при которых система переходит в одно из многих

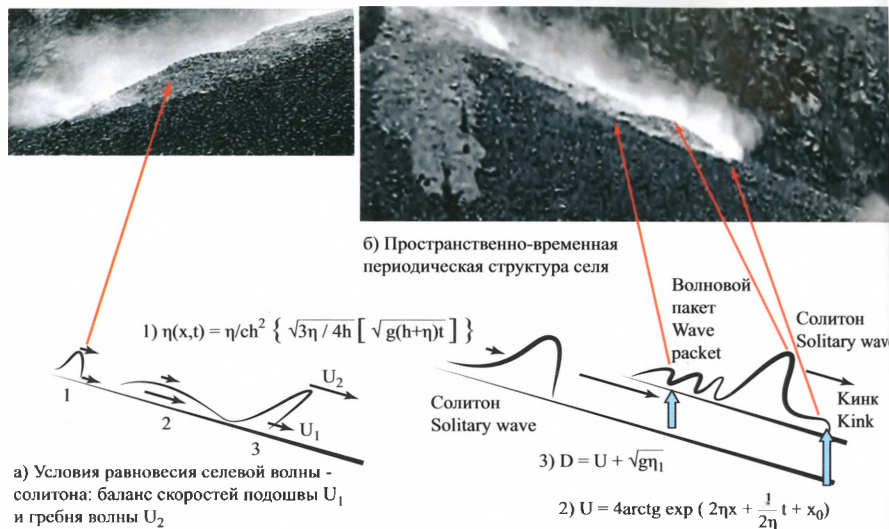


Рис. 3. Пространственно-временные периодические структуры, возникающие при движении селя



Рис. 4. Эволюция селевой геосистемы как триггерной геосистемы

допустимых равновероятных состояний. Финальным состоянием эволюционирующей физической системы (ПСМ) является прекращение ее эволюции при переходе в статическую фазу (формирование селевых отложений), достигаемое через прохожде-

ние системы через состояние динамического хаоса (сель).

Эволюцию селевой геосистемы (триггерной геосистемы) можно представить как непрерывную смену равновесных и неустойчивых состояний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 127 с.
2. Казаков Н.А. Волновая динамика селей // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1999. С. 33–49.
3. Казаков Н.А. Сейсмогенные факторы селевого процесса в низкорье (на примере о. Сахалин) // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. № 1. С. 75–81.
4. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 229 с.
5. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ИПК «Панорама», 2012. 575 с.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
7. Berge P., Pomeau Y., Vidal C. L'Ordere Dans Le Chaos. Paris: Hermann, Nouvelle edition corrigee. 1988.
8. Ebeling W. Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. BSB B. G. Teubner. Verlagessellschaft. 1976.
9. Feder E. 1988. Fractals. Plenum Press, New York
10. Haken H. Advanced Sinergetics. Springer -Verlag, Ser. Sinergetics, Berlin, Heidelberg. 1983.
11. Kazakov N.A., Minervin I.G. Mechanism of formation the debris-flow wawes in coherent debris-flows generation by rain // Proceedings of the Second International Conference of Debris-flow, Taipei, Taiwan. Rotterdam: Balkema, 2000. С. 397–402.