

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ГИДРОСФЕРЕ ЗЕМЛИ
HAZARDOUS PROCESSES AND PHENOMENA IN THE
HYDROSPHERE OF THE EARTH

УДК 624.131.544: 551.311.2: 627.141.1

DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.001

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В
СЕЛЕВОЙ ГЕОСИСТЕМЕ

Н.А. Казаков^{1,2}

¹ФГБУН Специальное конструкторское бюро
средств автоматизации морских исследова-
ний ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

²НИЦ «Геодинамика», г. Южно-Сахалинск,
Россия

cdsmd@yandex.ru

Аннотация. Рассматривая эволюцию селевой геосистемы как непрерывный процесс, включающий в себя последовательность стадий её эволюции (формирование массива рыхлообломочных пород в селевом очаге в результате геологических процессов, трансформация его в потенциальный селевой массив вследствие диагенеза и морфогенеза, возникновение и движение селя, разгрузка крупнообломочного и затем – тонкодисперсного материала и прохождение селевого паводка), можно описать каждую стадию эволюции селевой геосистемы как переход с одного подсистемного уровня на другой, а смену состояний системы, обусловленную физическими процессами, происходящими внутри системы – как фазовые переходы первого рода. Наиболее важен переход из твёрдого

PHASE TRANSITIONS IN THE
DEBRIS FLOW GEOSYSTEMS

Nikolay A. Kazakov^{1,2}

¹Special Research Bureau for Automation
of Marine Researches of the Far Eastern
Branch of Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Research Center «Geodynamics»,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

cdsmd@yandex.ru

Abstract. The evolution of a debris-flow geosystem can be described as a continuous process. Stages of geosystems evolution: the formation of a massif of loose rocks in a debris-flow site, its transformation to potential debris-flow massifs due to diagenesis and morphogenesis, the occurrence and movement of a debris flow, unloading of large-block and then – fine-dispersed material and the passage of a debris-flow. Each stage of the debris-flow geosystem evolution can be described as a transition from one subsystem level to another and the change of states of the system – as phase transitions of first kind. Physical processes occurring within the system cause it. The most important

состояния (потенциальный селевой массив как условно однородное твёрдое тело, обладающее внутренней структурой) в селевой поток (квазижидкое состояние). Эволюция потенциального селевого массива и обеспечение его перехода в другое фазовое состояние обусловлена не только внешними факторами (поступление в селевой очаг свободной воды), но и внутренними: прежде всего, минералогическим составом горных пород потенциального селевого массива (содержанием гидрофильных минералов). С этой точки зрения, важнейшим параметром, обуславливающим как связность грунтов потенциального селевого массива, так и условия его перехода в жидкую фазу, и позволяющим построить физическую модель, являются электрические силы на контактах между элементами минерального скелета (глинистыми частицами), обеспечивающие энергию связи между ними. Жидкая составляющая селе традиционно описывается как «селевая суспензия», однако с точки зрения физики суспензией связный сель не является, поскольку суспензия – это взвесь, грубодисперсная система, состоящая из твёрдой дисперсной фазы и жидкой дисперсионной среды, в которой твёрдое вещество равномерно распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном состоянии. Такая среда не способна переносить на большие расстояния глыбово-валунный материал, имеющий более высокую плотность, чем суспензия. Но связный сель представляет

transition is from a solid state (potential debris-flows massif-conditionally homogeneous solid having an internal structure) to a debris-flow and mudflow (quasi-liquid state). The transition of a potential debris-flow massif to another phase state is due not only to external factors (the inflow of free water into the debris-flow site), but also internal: the mineralogical composition of rocks of the potential debris-flow massif (the content of hydrophilic minerals). The most important parameter that determines both the connectivity of the soils of the potential debris-flow massif and the conditions of its transition to the liquid phase are the electric forces at the contacts between the elements of the mineral skeleton (soil particles). Electrical forces provide a connection between the ground particles. The liquid component of the mudflow is traditionally described as a "debris-flow suspension", but a coherent debris-flow and mudflow is not a suspension. A suspension is a dispersed system consisting of a solid dispersed phase and a liquid dispersion medium in which the solid is uniformly distributed as minute particles in a liquid substance in suspension. Such a medium is not able to carry over long distances block-boulder material having a higher density than the suspension. Nevertheless, a coherent debris-flow and mudflow is a conditionally single-phase system in

собой условно однофазную систему, в которой вода находится преимущественно в молекулярно связанном состоянии. Наиболее близкий физический аналог связанного селя – коллоидная система, поскольку в связанном селе частицы мелкозёма распределены в непрерывной дисперсионной среде и в осадок не выпадают. Это обстоятельство является ключевым при физическом моделировании связанных селей.

Ключевые слова: потенциальный селевой массив; связанный сель; селевой процесс; селевая геосистема; селевая суспензия; коллоид; фазовый переход.

which water is predominantly in a molecular bound state. The physical analogue of a coherent debris-flow and mudflow is a colloidal system, since in a connected village fine-earth particles are distributed in a continuous dispersion medium and do not precipitate. This circumstance is key in the physical modeling of connected debris-flows and mudflows.

Keywords: coherent Debris-Flow; debris flow; debris flow geosystems; phase transitions; suspension; colloidal system; potential debris-flow massif

Введение

При изучении селевых процессов исследователь сталкивается с рядом феноменов, не получивших достаточно убедительного объяснения в рамках классических представлений, сложившихся в селеведении: например, с феноменом возникновения селевых волн или с закономерностями трансформации массива рыхлообломочных горных пород в сель.

Нет убедительных объяснений феномену переноса на большие расстояния валунно-глыбового материала несвязными селями (*водо-каменными*).

По нашему мнению, одной из проблем является и то, что на сегодняшний день не существует удовлетворительных физических моделей селевого процесса, позволяющих адекватно описать как движущийся сель, так и селевой процесс в целом. Существующие математические модели, как правило, основаны на идеальных математических либо эмпирических представлениях, сильно упрощающих реальную картину селевого процесса, и описывают его лишь с большой степенью приближённости.

При этом единый процесс эволюции селевой геосистемы (формирование и развитие потенциального селевого массива, зарождение и движение селя, формирование селевых отложений) описывается дискретно: как явления слабо связанные (или не связанные) между собой.

Такой подход не позволяет построить единую модель селевого процесса, без чего не возможна разработка методологии прогнозирования селей с определёнными параметрами и создание новых методов противоселевой защиты.

Постановка задачи

Любой сложный физический объект (в том числе природный) или совокупность объектов, между которыми существуют физические связи, можно описать как физическую систему.

Такой подход позволил В.Б. Сочаве создать учение о геосистемах [Сочава, 1978]. В таком случае участок земной поверхности (ландшафт), на котором возникают сели, можно описать как селевую геосистему, в которой селевой бассейн, потенциальный селевой массив, сель, селевые отложения следует рассматривать и описывать как подсистемные уровни в селевой геосистеме.

Эволюция селевой геосистемы в нашем понимании – детерминированный процесс, обуславливающий седиментацию и диагенез горных пород в результате совокупного воздействия геологических, гидрометеорологических и геофизических факторов, возникновение, движение, разгрузку селя и формирование селевых отложений.

На разных этапах эволюции селевой геосистемы последовательно формируются потенциальный селевой массив, сель, селевые отложения.

Таким образом, селевой процесс можно описать как детерминированный упорядоченно-стохастический процесс, которому присуща внутренняя связь и непрерывность.

Области существования диссипативных структур в литологической компоненте (потенциальный селевой массив) селевой геосистемы и границы их устойчивости математически могут быть описаны как странные аттракторы методами теории катастроф [Арнольд, 1990].

Традиционно сель и потенциальный селевой массив описываются как разные объекты. Однако их правомерно описывать как разные стадии эволюции одного и того же объекта – литологической компоненты селевой геосистемы [Казаков, 2015].

Тогда формирование потенциального селевого массива, возникновение, движение и разгрузку селя можно рассматривать как разные стадии единого непрерывного процесса эволюции литологической компоненты селевой геосистемы при переходе её из неустойчивого состояния в устойчивое [Казаков, 2015] (рисунок 1).

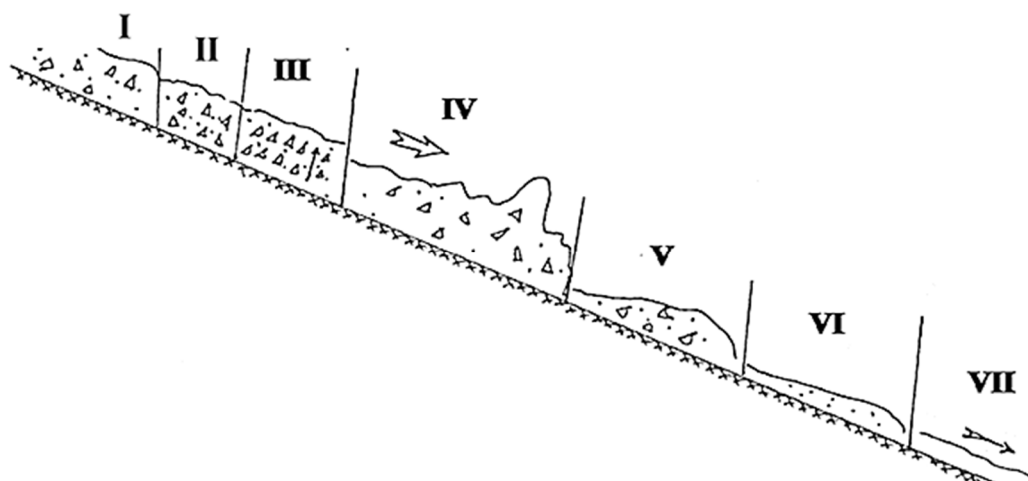


Рисунок 1. Самоорганизация упорядоченных структур в ходе эволюции селевой геосистемы.

Стадии селевого процесса:

- I – формирование массива рыхлообломочных пород в селевом очаге (седиментация);
- II – формирование потенциального селевого массива (диагенез и морфогенез);
- III – неравновесная (триггерная) стадия эволюции потенциального селевого массива;
- IV – формирование и движение селя (динамический хаос);
- V – торможение селя и формирование конуса выноса селя;
- VI – формирование шлейфа тонкодисперсных селевых отложений (песчаных, супесчаных, глинистых);
- VII – движение водной составляющей селя (послеселевой паводок)

Figure 1. The self-organization of ordered structures on evolution of debris-flow geosistem.

Stages of debris-flow process:

- I – formation of an massif of loose rocks in a debris-flow site (sedimentation);
- II – formation of a potential debris-flow massif (diagenesis and morphogenesis);
- III – nonequilibrium (trigger) stage of evolution of a potential debris-flow massif;
- IV – formation and movement of a debris-flow (dynamic chaos);
- V – braking of a debris-flow and formation of a debris-flow deposits;
- VI – formation of a plume of fine debris-flow sediments (sandy, sandy loam, clay);
- VII – movement the water component of the debris-flow (post- debris-flow flood)

В ходе эволюции селевой геосистемы в ней последовательно происходит самоорганизация диссипативных структур [Ebeling, 1976; Naken, 1983]: пространственно-неоднородных (отображаемых в структуре потенциального селевого массива); временных периодических (отображаемых в системе автоволн потенциального селевого массива);

пространственно-временных периодических (сель). Каждая стадия развития подсистемы «литологическая компонента» описывается как подсистемный уровень в селевой геосистеме, а смена стадий – как фазовые переходы с одного подсистемного уровня на другой [Казаков, 2015].

Процессы, ведущие к образованию упорядоченных структур, направлены на переход системы из хаотического состояния в упорядоченное и приводят к изменению её физических характеристик.

Смену стадий эволюции селевой геосистемы можно описать как переходы с одного подсистемного уровня геосистемы на другой – фазовые переходы [Казаков, 2019].

Методы исследования

В основу настоящей статьи положены результаты полевых исследований селевых процессов, проводившихся автором в 1978-2019 гг. на островах Сахалин, Парамушир, Шикотан, Кунашир, Итуруп, на Западном и Северном Кавказе, в Закавказье, на Кольском полуострове, в Восточной Сибири, в Забайкалье, Саянах и в Крыму. Исследовался гранулометрический, минералогический и химический состав селевых отложений и потенциальных селевых массивов, геоморфологические и геоботанические признаки проявления селевых процессов. В работе с различной степенью полноты использованы данные исследований 817 сошедших селей, 145 шурфов и разрезов в селевых отложениях и потенциальных селевых массивах.

Анализ динамики селей выполнялся как на основе прямых наблюдений, так и по видеоматериалам (фильм о Чемолганском селевом эксперименте, а также материалы видеосъёмки селей в разных районах мира, размещённые в сети Интернет).

Результаты и их обсуждение. Селевая смесь как коллоидная система

Одним из важнейших вопросов, возникающих при исследовании селей, является вопрос о природе и физических свойствах селевой смеси.

Жидкая составляющая селея (в том числе, грязекаменного) – селевая смесь – часто описывается как «селевая суспензия» [Руководство..., 1990; Степанов, Степанова, 1991; Перов, 1996; Перов, 2012].

Однако с точки зрения физики суспензией связный сель не является, поскольку суспензия – это взвесь, двухфазная грубодисперсная система, состоящая из твёрдой дисперсной фазы и жидкой дисперсионной среды, в которой твёрдое вещество равномерно

распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном состоянии и со временем выпадает в осадок [Химический энциклопедический словарь, 1983].

Такая среда не способна переносить на большие расстояния глыбово-валунный материал, имеющий более высокую плотность, чем суспензия.

С точки зрения физики, жидкая среда плотностью 1500-1700 кг/м³ не может переносить на большое расстояние валуны и глыбы плотностью 2100 кг/м³ и более.

Сель, переносящий большие обломки горных пород, по своей сути не может быть несвязным, ибо транспортирующая среда должна либо иметь плотность, соизмеримую с плотностью переносимого материала, либо иметь большую вязкость, позволяющую переносить крупнообломочный материал внутри самой среды.

Перенос на достаточно большие расстояния валунно-глыбового материала водным потоком (сель как двухфазная система) не представляется возможным: реально происходит перемещение крупнообломочного материала как срыв самоотмостки русла на сравнительно короткое расстояние и преимущественно в придонной части потока. Такие сели могут описываться как несвязные (наносоводные).

По этой причине, термин *водо-каменный сель* представляет собой не более, чем оксюморон. Использование в классификационных схемах термина *водо-каменный сель* представляется избыточным и не соответствующим феноменологии селей.

Такое же мнение о правомерности выделения *водо-каменных селей* высказывали и другие исследователи [Флейшман, 1978; Виноградов, 1980].

В отложениях селей, определяемых как *водо-каменные*, как правило, обнаруживаются селевые обмазки, свидетельствующие о том, что «жидкая составляющая» селя реально была насыщена глинистыми частицами и представляла собой связную среду.

Кроме того, зачастую послеселевыми паводками из крупнообломочных селевых отложений вымывается большая часть мелкозёма, что приводит исследователей к ошибочному выводу о том, что глыбово-валунный материал переносился водным потоком.

Реальный связный сель (грязевой и грязекаменный) представляет собой условно однофазную систему, в которой вода находится преимущественно в молекулярно связанном состоянии, а грубообломочный материал распределён внутри самой системы.

Наиболее близкий физический аналог связного селя – коллоидная система, поскольку в связном селе частицы мелкозёма распределены в непрерывной дисперсионной среде и в осадок не выпадают. Такого же взгляда на природу связных селей придерживался С.М. Флейшман [Флейшман, 1978].

Коллоидная система при меньшей плотности способна удерживать во взвешенном состоянии внутри смеси глыбы и валуны большей плотности, чем вмещающая система.

Такое агрегатное состояние селевой смеси необходимо учитывать при физическом и математическом моделировании связных селей.

Самоорганизация пространственно-неоднородной упорядоченной структуры потенциального селевого массива накопления и коллоидные свойства селевой смеси обуславливаются физическими свойствами мелкозёма потенциального селевого массива, образующего вертикальные элементы его текстуры – кластеры глинистых агрегатов (рисунок 2).

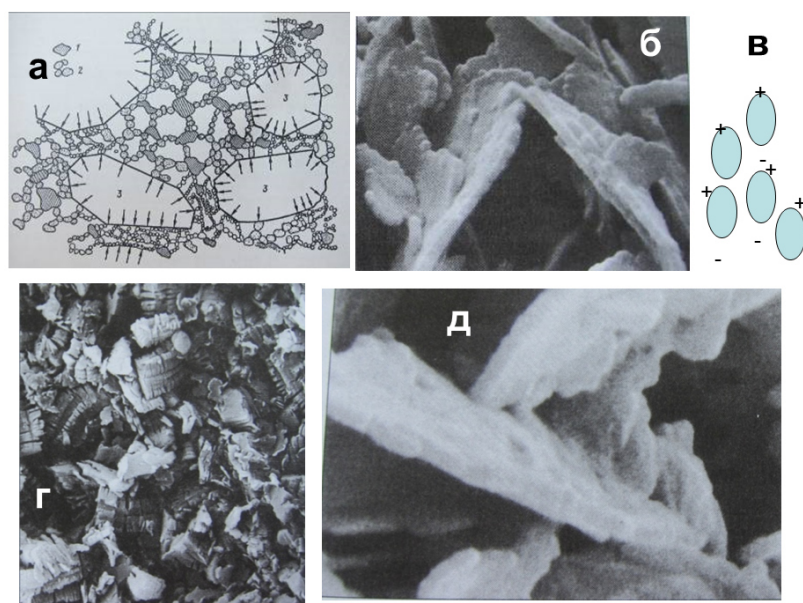


Рисунок 2. Пространственно-неоднородная упорядоченная структура потенциального селевого массива накопления: а, г – структура глины [Цытович, 1983]; б, д – вертикальный элемент текстуры потенциального селевого массива – кластер глинистых агрегатов [Осипов, Соколов, 2013]; в – электрические заряды на частицах глинистых минералов

Figure 2. Spatially heterogeneous self-organized structure of potential debris-flow massifs of accumulation: а, г – structure of clay [Cytovich, 1983]; б, д – vertical texture element of potential debris-flow massif – cluster of clay aggregates [Osipov, Sokolov, 2013]; в – electric charges on particles of clay minerals

Образование фазовых контактов между глинистыми частицами обусловлено ионно-электростатическими силами (рисунок 3). Фазовые контакты обладают высокой прочностью, иногда превосходящей прочность самих контактирующих минералов [Осипов, 2012]. При плотном контакте глинистых частиц с молекулярно гладкими базисными поверхностями и

взаимном перекрытии частиц на значительной площади возможно образование фазового контакта за счёт ионно-электростатических связей.

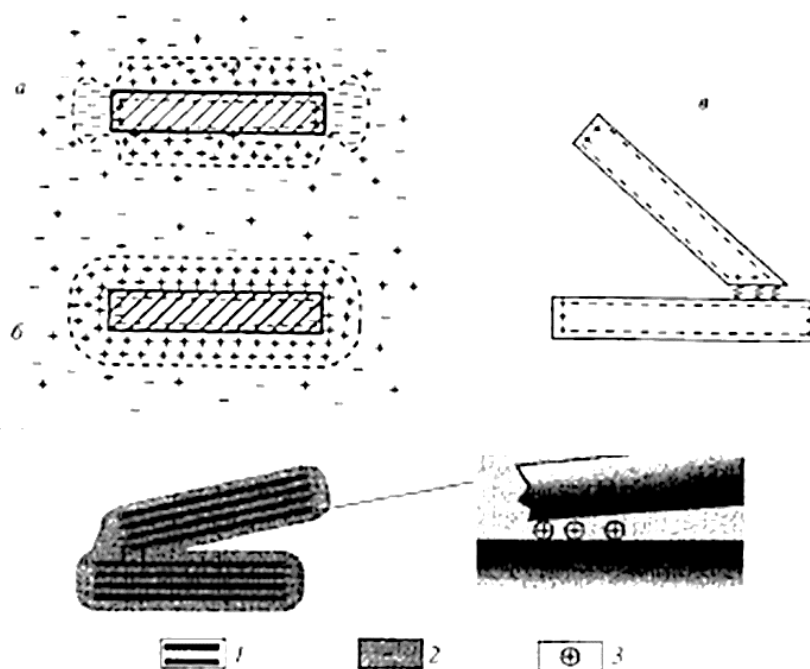


Рисунок 3. Силы электрического взаимодействия в потенциальном селевом массиве и в селевой смеси. Схема электростатического взаимодействия глинистых частиц (ионно-электростатическое взаимодействие глинистых частиц): 1 – глинистая частица; 2 – связанная вода; 3 – катионы, формирующие ионно-электростатические связи. [Осипов, 2012]

Figure 3. Forces of electrical interaction in a potential debris-flow massif and in a debris-flow mixture. Scheme of electrostatic interaction of clay particles (ion-electrostatic interaction): 1 – clay particle; 2 – bound water; 3 – cations forming ion-electrostatic bonds. [Osipov, 2012]

Таким образом, в селевой смеси, содержащей достаточное количество глинистых гидрофильных минералов, возникают условия для образования коллоидной системы, которую можно описать как условно однофазную систему, обладающую большой вязкостью и структурно однородную – способную переносить внутри себя обломки горных пород, плотность которых превышает плотность самого коллоида.

По мнению С.М. Флейшмана [Флейшман, 1978], для придания водно-грунтовой системе, обладающей коагуляционной структурой, коллоидных свойств, необходимых для придания грунтовой массе связности и других структурно-механических свойств, присущих структурированным коагуляционным системам, достаточно содержания в системе 8-10%

тонкодисперсных фракций по отношению к грубодисперсным гидрофобным песчаным крупнообломочным фракциям.

В 2008-2010 гг. нами проводились исследования гранулометрического, минералогического и химического состава мелкодисперсной фракции селевых отложений в селевых бассейнах на восточном побережье Южного Сахалина, на о. Парамушир, в бассейне р. Мзымта (Западный Кавказ) и в бассейне р. Герхожан-Су (Северный Кавказ). Исследования показали, что в составе мелкодисперсной фракции отложений грязекаменных селей дождевого генезиса повсеместно выделяется большое содержание в составе мелкодисперсной пылеватых частиц (не менее 14% фракций $<0,05 - 0,002$ мм), значительного содержания агрегированных тонкоглинистых фракций ($<0,001$ мм), гидрослюд и монтмориллонита [Казаков и др., 2012] (Таблица 1).

Важно отметить, что в отложениях грязекаменных селей повсеместно (в разных географических районах) наблюдается такое высокое содержание пылеватых частиц, агрегированных тонкоглинистых фракций, гидрослюд и монтмориллонита: даже в тех случаях, когда гранулометрический состав селевых отложений описывается как *супесь*.

По нашему мнению, именно этим обстоятельством и объясняются физическое состояние селевой смеси как коллоидной системы и, соответственно, условия для формирования связных грязекаменных селей.

Затем, при исследовании селевых отложений исследователи, как правило, упускают из вида это обстоятельство, и, определив гранулометрический состав селевых отложений как *супесь*, приходят к ошибочному выводу о том, что прошедший селёк был несвязным – *водокаменным*.

Именно этими характеристиками пород обуславливаются структурно-реологические характеристики связных селей: в частности, способность связных селей переносить на большое расстояние валунно-глыбовый материал, формируя грязекаменные потоки большого объёма, и возникновение периодических волн при движении селя.

Высокое содержание пылеватых частиц и тонкоглинистой фракции с преобладанием гидрофильных минералов обуславливает преимущественно связное состояние воды в селевой смеси. В этом состоянии селевая смесь может описываться как однофазная система.

Такая система обладает высокой плотностью и, соответственно, высокой транспортирующей способностью, чем и обеспечивается перенос валунно-глыбового материала на большие расстояния внутри селевой смеси и, собственно, формирование грязекаменных селей.

Таблица 1. Гранулометрический и минералогический состав мелкодисперсной части селевых отложений и рыхлообломочных пород потенциальных селевых массивов.

Table 1. Granulometric and mineralogical composition of fine-dispersed part of the debris-flow deposits and a loose rock of potential debris-flow massifs.

Адрес Address	Гранулометрический состав Granulometric composition		Плотность минеральной части, г/см ³ Density of mineral part, g/cm ³	Содержание пылеватых частиц <0,05-0,002 мм, %% Content of dusty particles <0.05-0.002 mm, %%	Содержание фракции <0,002 мм, %% The contents of the fraction <0.002 mm, %%	Содержание тонкоглинистой фракции <0,001 мм, %% Content of fine clay fraction <0.001 mm, %%	Реальная глинистость (содержание фракции <0,002 мм в свободном состоянии и в составе агрегатов), %% The actual clay content on (the content of fraction <0.002 mm in the free state and in the composition of the units), %%	Агрегированность (общее количество агрегатов), %% The degree of aggregation (total number of units), %%	Гидрослюда Pillite	
	Сугиль Clay sand	Пилит Pillite								
р. Мзымта, Западный Кавказ Mzymta River, Western Caucasus	2,53	18,2	3,1	7,0	8,1	5,3	30,8			
р. Герхожан-Су, Северный Кавказ Gerkhozhan-Su River, North Caucasus	2,52	25,8	7,6	10,2	11,2	9,2				
р. Можайка, Южный Сахалин Mozhaika River, Southern Sakhalin	2,42	14,4	3,2	11,3	13,0					

Фазовые переходы в селевой геосистеме

Рассматривая эволюцию селевой геосистемы как непрерывный процесс [Казаков, 2015], включающий в себя последовательность стадий её эволюции (формирование массива рыхлообломочных горных пород в селевом очаге в результате геологических процессов, трансформация его в потенциальный селевой массив вследствие его диагенеза и морфогенеза, возникновение и движение селя, разгрузка крупнообломочного и затем – тонкодисперсного материала и прохождение селевого паводка), можно описать каждую стадию эволюции селевой геосистемы как переход с одного подсистемного уровня на другой, а смену состояний системы, обусловленную физическими процессами, происходящими внутри системы, – как фазовые переходы.

Фаза представляет собой термодинамически равновесное состояние веществ – *фазовое состояние* (потенциальный селевой массив – селя – селевые отложения).

Переход вещества из одного фазового состояния в другое – *фазовый переход I рода* – связан с качественным изменением свойств вещества при переходе системы из одного агрегатного состояния в другое и сопровождается скачкообразным изменением структуры и свойств (плотности, теплоёмкости, внутренней энергии, энтропии и др.) [Физический энциклопедический словарь, 1983].

При переходах селевой геосистемы с одного уровня на другой изменяется агрегатное состояние системы: твёрдое вещество – коллоид – жидкая среда – твёрдое вещество (рисунок 4).

При этом изменяются и физические характеристики системы: в первую очередь, плотность (потенциальный селевой массив – селя – селевые отложения).

Вопрос об изменении теплоёмкости, внутренней энергии и других физических параметров при трансформации потенциального селевого массива в селя не исследован и остаётся открытым.

При переходах селевой геосистемы с одного уровня на другой (потенциальный селевой массив – селя – селевые отложения) изменяется также энтропия системы как параметр, описывающий её как информационную систему [Накен, 1983]: изменяется степень упорядоченности системы и тип её структуры [Казаков, 2015].

Наиболее важными представляются переходы из твёрдого состояния (потенциальный селевой массив как условно однородное твёрдое тело, обладающее внутренней структурой) в связанный селевой поток (квазижидкое состояние) и затем из квазижидкого – вновь в твёрдое

при остановке селя и формировании селевых отложений (при этом происходит разделение твёрдого и жидкого вещества и удаление последнего за пределы селевого конуса выноса).

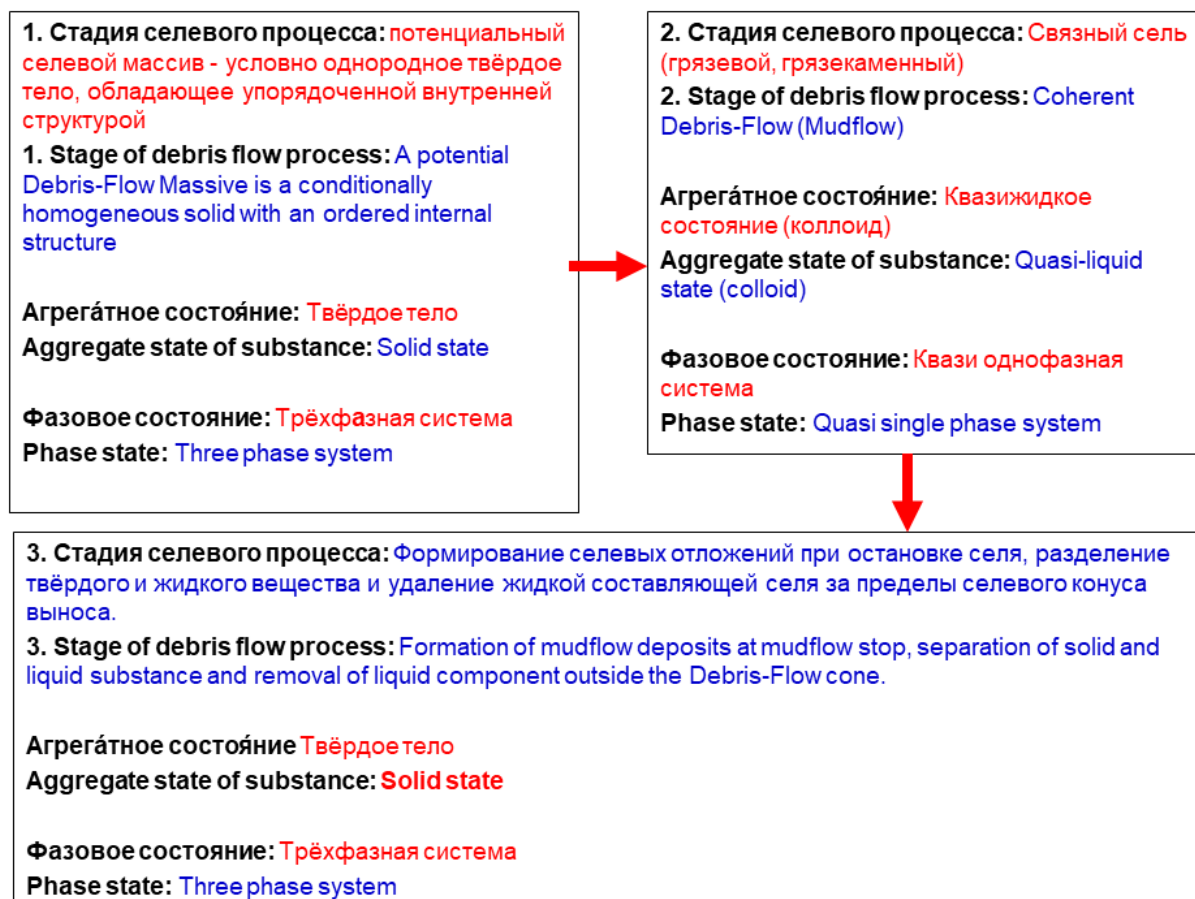


Рисунок 4. Фазовые переходы в селевой геосистеме

Figure 4. Phase transitions in the debris flow geosystems

Эволюция потенциального селевого массива и его переход в другое фазовое состояние обуславливаются не только внешними (поступление в селевой очаг свободной воды), но и внутренними факторами: прежде всего, минералогическим составом горных пород потенциального селевого массива, наиболее важным из которых является наличие в составе пород тонкодисперсных глинистых частиц и гидрофильных минералов.

С этой точки зрения, важнейшим параметром, обуславливающим как связность грунтов потенциального селевого массива, так и способность его трансформации в коллоидную систему, и позволяющим построить физическую модель селевого процесса, являются электрические силы на контактах между элементами минерального скелета (грунтовыми частицами), обеспечивающие энергию связи между ними [Цытович, 1983; Охотин, 2008; Осипов, 2012; Осипов, Соколов, 2013].

Выводы

1. Эволюция литологической компоненты селевой геосистемы – непрерывный процесс самоорганизации упорядоченных структур, сопровождающийся сменой равновесных и неустойчивых состояний системы, обусловленной физическими процессами, происходящими внутри системы. Переходы системы с одного подсистемного уровня на другой являются фазовыми переходами I рода.

2. При фазовых переходах в литологической компоненте селевой геосистемы изменяется её агрегатное состояние (твёрдое вещество – коллоид – жидкая среда – твёрдое вещество). Процесс сопровождается скачкообразным изменением структуры и свойств системы и изменением её физических характеристик: в первую очередь, плотности (потенциальный селевой массив – сель – селевые отложения).

3. Наиболее близкий физический аналог связного селя – коллоидная система. Именно это агрегатное состояние селевой смеси определяет его динамику, что необходимо учитывать при физическом моделировании связных селей. Селевая смесь в связном селе является не суспензией, а коллоидной системой, которая способна при меньшей плотности удерживать во взвешенном состоянии внутри смеси глыбы и валуны большей плотности, чем вмещающая система.

4. Использование термина *водо-каменный сель* представляется избыточным и не соответствующим феноменологии селей, поскольку жидкая среда плотностью 1500-1700 кг/м³ не может переносить на большое расстояние валуны и глыбы плотностью 2100 кг/м³ и более. Сель, переносящий большие обломки горных пород, не может быть несвязным, ибо транспортирующая среда должна либо иметь плотность, соизмеримую с плотностью переносимого материала, либо иметь большую вязкость, позволяющую переносить крупнообломочный материал внутри самой среды.

5. Важнейшим параметром, обуславливающим связность грунтов потенциального селевого массива и способность его трансформации в коллоидную систему, являются электрические силы на контактах между элементами минерального скелета (грунтовыми частицами).

6. Эволюция потенциального селевого массива и его перехода в другое фазовое состояние обуславливаются не только внешними (поступление в селевой очаг свободной воды), но и внутренними факторами: минералогическим составом горных пород

потенциального селевого массива, наиболее важным из которых является наличие в составе пород тонкодисперсных глинистых частиц и гидрофильных минералов.

7. В отложениях грязекаменных селей в разных географических районах наблюдается высокое содержание пылеватых частиц, агрегированных тонкоглинистых фракций, гидрослюды и монтмориллонита: даже в тех случаях, когда гранулометрический состав селевых отложений описывается как *супесь*. Этим объясняется преимущественное физическое состояние селевой смеси как коллоидной системы: то есть условий для формирования связных грязекаменных селей. При исследовании селевых отложений исследователи упускают из вида это обстоятельство, и, определив гранулометрический состав селевых отложений как *супесь*, приходят к ошибочному выводу о том, что прошедший сель был несвязным: *водо-каменным*.

8. Описание селевого процесса как цепи фазовых переходов, а селевой смеси как коллоидной системы открывает новые принципиальные подходы к разработке мер противоселевой защиты. Воздействуя на потенциальный селевой массив и связный сель искусственными электрическими полями, можно изменять агрегатное состояние системы и, соответственно, динамику селевого процесса.

Литература

References

Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.

Arnol'd V.I. *Teoriya katastrof [The theory of catastrophes]*. Moscow, Publ. Nauka, 1990. 128 p. (In Russian).

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 144 с.

Ebeling W. *Strukturbildung bei Irreversiblen Prozessen – Eine Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen*. Leipzig, Publ. BSB Teubner, 1976. 194 p. (Russ. ed. *Obrazovanie struktur pri neobratimyykh protsessakh. Vvedenie v teoriyu dissipativnykh struktur*. Moscow, Publ. Mir, 1979. 280 p.)

Казаков Н.А. Селевой процесс как цепь фазовых переходов // Тезисы докладов III Всероссийской конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (г. Южно-Сахалинск, 27-31 мая

Fleishman S.M. *Seli [Mudflow]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1978. 312 p. (In Russian).

Haken H. *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, Ser. Sinergetics, vol.40. 1983. 258 p. (Russ. ed.:

- 2019 г.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 140.
- Казаков Н.А. Эволюция селевой геосистемы как процесс самоорганизации упорядоченных структур // Геориск. 2015. № 2. С. 28-30.
- Казаков Н.А., Рященко Т.М., Генсиоровский Ю.В., Ухова Н.Н. Состав пород потенциальных селевых массивов как фактор, определяющий структурно-реологический тип селевого потока // Труды Второй конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», посвященной 100-летию С.М. Флейшмана (г. Москва, 17-19 октября 2012 года) / Отв. ред. С.С. Черноморец. М.: Географический факультет МГУ, 2012. С. 45-46
- Осинов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИФЗ РАН, 2012. 72 с.
- Осинов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства: состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 575 с.
- Охотин В.В. Грунтоведение. СПб: Центр генетического грунтоведения, 2013. 231 с.
- Khaken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya. Makroskopicheskiy podkhod k slozhnym sistemam*. Moscow, Mir Publ., 1991. 240 p.)
- Kazakov N.A. Selevoi protsess kak tsep' fazovykh perekhodov [Mudflow process as a chain of phase transitions]. *Tezisy dokladov Tret'ei Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy»* (g. Yuzhno-Sakhalinsk, 27-31 maya 2019 g.) [Abstracts of the Third National scientific conference with foreign participants "Geodynamical Processes and Natural Hazards" (Yuzhno-Sakhalinsk, 27-31 of May 2019)]. Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. IMGG FEB RAS, 2019. P. 140. (In Russian).
- Kazakov N.A. Evolyutsiya selevoi geosistemy kak protsess samoorganizatsii uporyadochennykh struktur [Evolution of the debris-flow geosystem as process of self-organization of the ordered structures]. *Georisk [Georisk]*, 2015, No 2, pp. 28-30, 60. (in Russian; summary in English)
- Kazakov N.A., Ryashchenko T.M., Gensiorovskiy Y.V., Ukhova N.N. Sostav porod potentsial'nykh selevykh massivov kak faktor, opredelyayushchii strukturno-reologicheskiy tip selevogo potoka [Rock composition of potential debris-flows massives as a factor defining structural and rheological type of debris flows]. *Trudy Vtoroi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita», posvyashchennoi 100-letiyu S.M. Fleishmana* (g. Moskva, 17-19 oktyabrya 2012 goda) [Proceedings of the Second Conference «Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection» dedicated to 100th anniversary of S.M. Fleishman (Moscow, October 17-19, 2012)]. Moscow, Publ. Geograficheskii fakul'tet MSU, 2012, pp. 45-46. (In Russian).

- Перов В.Ф. Селеведение: учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
- Перов В.Ф. Селевые явления: терминологический словарь. М.: Издательство Московского университета, 1996. 45 с.
- Руководящий документ РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Выпуск 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеоздат, 1990. 200 с.
- Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей: эксперимент, теория, методы расчета. М.: Гидрометеоздат, 1991. 379 с.
- Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.
- Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 312 с.
- Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам / Пер. с Knunyants I.L. *Khimicheskii entsiklopedicheskii slovar' [Chemical Encyclopedic Dictionary]*. Moscow, Publ. of Soviet Encyclopedia, 1983. 791 p. (In Russian).
- Okhotin V.V. *Gruntovedenie [Soil science]*. St. Peterburg, Publ. of Center for Genetic Soil Science, 2013. 231 p. (In Russian).
- Osipov V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh [Physicochemical theory of effective stresses in soils]*. Moscow, Publ. IFZ RAN, 2012. 72 p. (In Russian).
- Osipov V.I., Sokolov V.N. *Gliny i ikh svoistva: sostav, stroenie i formirovanie svoistv [Clays and their properties: composition, structure and formation of properties]*. Moscow, Publ. GEOS, 2013. 575 p. (In Russian).
- Perov V.F. *Selevedenie: uchebnoe posobie*. Moscow, Moscow University Press, 2012. 272 p. (In Russian).
- Perov V.F. *Selevye yavleniya: terminologicheskii slovar' [Mudflows: a terminological dictionary]*. Moscow, Moscow University Press, 1996. 45 p. (In Russian).
- Prokhorov A.M. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar' [Physical Encyclopedic Dictionary]* Moscow, Publ. of Soviet Encyclopedia, 1983. 928 p. (In Russian).
- Rukovodyashchii dokument RD 52.30.238-90. Rukovodstvo selestokovym stantsiyam i gidrograficheskim partiyam. Vypusk 1. Organizatsiya i provedenie rabot po izucheniyu selei [Guiding document RD 52.30.238-90. Management of mudflow runoff stations and hydrographic parties. Issue 1. Organization and conduct of work on the study of mudflows]*. Moscow, Hidrometeoizdat Publ., 1990. 200 p. (In Russian).

- англ. Ю.А. Данилова. М.: Мир, 1991. 240 с.
- Химический энциклопедический словарь / Гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Советская энциклопедия, 1983. 791 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
- Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур / Пер. с нем. А.С. Добро-славского; под ред. Ю.Л. Климон-товича М.: Мир, 1979. 280 с.
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh [Introduction to the doctrine of geosystems]*. Novosibirsk, Publ. Nauka, 1978. 319 p. (In Russian).
- Stepanov B.S., Stepanova T.S. *Mekhanika selei: eksperiment, teoriya, metody rascheta [Mudflow mechanics: experiment, theory, calculation methods]*. Moscow, Publ. Gidrometeoizdat, 1991. 379 p. (In Russian).
- Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkii kurs): ucheb- nik dlya stroit. Vuzov [Soil mechanics (short course): a textbook]*. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).
- Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 144 p. (In Russian).