

УДК 551.311.21:624

Доктор геогр. наук Б.С. Степанов *

К ПРИРОДЕ ГРЯЗЕКАМЕННЫХ СЕЛЕЙ*СЕЛЕВОЙ ПОТОК, ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ПЛОТНОСТЬ СЕЛЕВОЙ МАССЫ, ВЯЗКОСТЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ, ГЛУБИНА ПОТОКА, МОЩНОСТЬ ПОТОКА*

Общепринято считать, что плотность селевой массы однозначно определяется уклоном русла. Развитие гравитационной теории М.А. Великанова позволило установить, что в наиболее важных для практики ситуациях одному значению уклона русла соответствует два устойчивых и одно неустойчивое значение плотности селевой массы. Это привело к открытию неизвестного ранее природного явления – скачкообразного изменения плотности селевой массы при превышении уклоном русла критического значения.

Перемещение водных и селевых потоков по земной поверхности обусловлено преимущественно наличием потенциальной энергии и возможностью её трансформации в кинетическую и другие виды энергий. Ограничение роста кинетической энергии объясняется противодействием сил различной природы: молекулярной и турбулентной вязкостью движущихся масс, их пластичностью, «сухим» трением на границе «поток – русло», соударением, скалыванием и истиранием горных пород, упругостью горных пород и воздуха, благодаря которой генерируются акустические и сейсмические волны и т.д. Значительная часть потенциальной энергии потока может затрачиваться на перемещение твердых частиц (взвешивание твёрдых частиц, их перемещение сальтацией, качением и скольжением).

Соотношение движущей силы и сил сопротивления в значительной мере определяет предельно возможную концентрацию твёрдой составляющей в селевой массе. Относительный объём селевой массы, образующейся из единичного объёма воды, в зависимости от объёмной концентрации твёрдой составляющей (при влажности селеформирующих горных пород, равной нулю), определяется как

* РГП «Казгидромет», г. Алматы

$$N = \frac{1}{1 - C}, \quad (1)$$

где N – относительный объём селевой массы; C – объёмная концентрация твёрдой составляющей.

При влажности породы, близкой к полной влагоёмкости, а также в определённых геолого-геоморфологических условиях соотношение «исходный объём воды – объём селевой массы» может увеличиться на порядки в результате так называемого цепного селевого процесса [17].

Плотность селевой массы (наряду с минералогическим и гранулометрическим составами твёрдой составляющей) определяет её реологические свойства и, тем самым, оказывает большое влияние на кинематические и динамические характеристики селей.

К семидесятым годам 20 века господствовало представление о двух механизмах образования селевой массы. Считалось, что селевая масса образуется в результате:

- взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами;
- сдвига и разжижения водонасыщенных массивов рыхлообломочных пород.

Физическая интерпретация механизмов селеобразования, при которых сопротивление движению селевого потока обусловлено кулоновским трением или предельным напряжением сдвига селевой массы, проста: подготовительная стадия образования массива рыхлообломочных пород, поровое пространство которого, практически равномерно заполнено водой или коллоидным раствором, завершена. Для трансформации этого массива в селевую массу достаточно создать условия, при которых будет иметь место его деформация. Деформация начинается в процессе сдвига, когда сдвигающие силы превзойдут удерживающие. Разрушение структуры массива способствует росту сдвигающих сил и уменьшению удерживающих, при этом водогрунтовая масса обретает свойство текучести.

Если в сопротивлении движению селевого потока превалирует кулоновское трение, селевая масса образуется в результате разжижения водонасыщенных массивов рыхлообломочных пород, содержание коллоидных частиц в которых незначительно. Критические условия сдвига таких пород описаны в работах Р.А. Багнольда [22], Т. Такахаша [24, 25], Ю.Б. Виноградова [5], В.М. Лятхера и Н.Г. Квашилава [12], и других исследователей.

По Р.А. Багнольду, сдвиг рыхлообломочных пород происходит, когда угол наклона подстилающей поверхности превышает значение, определяемое уравнением

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{C_* (\rho_T - \rho_o) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{C_* (\rho_T - \rho_o) + \rho_o}, \quad (2)$$

где C_* – объемная концентрация рыхлообломочных пород до момента сдвига; ρ_T – плотность рыхлообломочных пород; ρ_o – плотность воды; φ – угол естественного откоса.

Структура уравнения (2) свидетельствует о том, что в обсуждаемой модели все твердые частицы, находясь в воде, жестко контактируют между собой, а их перенос во взвешенном состоянии отсутствует.

Согласно Р.А. Багнольда [22], за угол естественного откоса, принималось значение, близкое к углу внутреннего трения. Т. Такахаша допускал, что $\operatorname{tg} \varphi$ может быть меньше угла естественного откоса, из этого следовал важный вывод о возможности превышения концентрации твердой составляющей в селевом потоке, нежели в селеформирующих грунтах.

Если водонасыщенный массив рыхлообломочных пород содержит пылевато-глинистые фракции в количестве, достаточном для образования свойства пластичности, процесс «созревания» происходит по схеме, подробно описанной в работе Г.М. Беручашвили и В.И. Кокориашвили [1].

В условиях преобладания вязкопластического сопротивления движению селевого потока, в предположении о том, что даже крупные обломки горных пород находятся в квазивзвешенном состоянии (кулоновское трение отсутствует), движение селевой массы происходит, как известно, при выполнении условия

$$H = \frac{\tau_o}{\rho g \sin \alpha}, \quad (3)$$

где H – мощность водонасыщенного массива рыхлообломочных пород; ρ – плотность водонасыщенных горных пород; g – ускорение сводного падения; α – угол наклона подстилающей поверхности; τ_o – предельное напряжение сдвига.

Важную роль в понимании процессов, связанных с формированием рельефа конусов выноса, образуемых отложением вязкопластических селевых масс на предгорной равнине [16, 21], играет то обстоятельство, что после остановки селевого потока на участке с малым уклоном глубина потока может увеличиться до значения, при котором (в соответствии с

уравнением (3)), движение селевого потока на относительно меньшем уклоне становится возможным.

При заполнении селехранилищ (образуемых глухими плотинами) вязкопластические свойства селевых масс, наряду с мощностью отложений, определяют уравнивающий уклон поверхности отложений, от которого в решающей мере зависит ёмкость селехранилищ [20].

Наиболее трудной для понимания оказалась природа формирования селей, образующихся в результате взаимодействия сосредоточенных водных потоков с рыхлообломочными породами, плотность которых приближается к плотности селеформирующих пород.

Впервые возможность образования грязекаменных потоков в результате трансформации водного потока в сель (в натуральных масштабах) была доказана в результате экспериментов по искусственному воспроизведению селей на Шамалганском полигоне в период 1972...1978 гг. [11].

В 1973 г. водный поток с максимальным расходом около 350 м³/с, образовавшийся в результате прорыва гляциального озера на леднике Туюксу, трансформировался в грязекаменный сель с расходом 10 тыс. м³/с, средняя плотность селевой массы оценена в 2390 кг/м³.

Однако и после этих селей природа образования селевой массы объяснялась насыщением порового пространства массива рыхлообломочных пород водой с последующим их сдвигом и разжижением [6]. По Ю.Б. Виноградову, транспортно-сдвиговый селевой процесс развивается при расходах воды и уклоне, превышающих критические значения; при этом «... порода ... приобретает возможность самостоятельного массового лавинного движения и, перемещаясь вместе с водой, перемешивается и, в конце концов, формирует селевую массу высокой плотности» [6].

Шамалганские эксперименты показали, что вибрации, создаваемые при движении селя, недостаточны для разрушения структуры руслообразующего грунта в мере, существенно увеличивающей скорость фильтрации, которая могла бы способствовать быстрому насыщению водой массивов рыхлообломочных пород до состояния, при котором можно ожидать их «... самостоятельного массового лавинного движения».

Результаты анализа явлений, наблюдавшихся во время проведения Шамалганских экспериментов (запечатлённых на киноплёнке), связанных с зарождением селей в процессе взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами и движением селей в транзитной зоне (русло сформировано в прочных скальных породах), свидетельствуют:

– средние скорости движения жидкой и твёрдой составляющих селевой массы практически одинаковы; это доказывает, что твёрдая составляющая не транспортируется водой (смесью воды с относительно мелкими фракциями твёрдой составляющей), а перемещается за счёт собственной потенциальной энергии;

– практически все фракции твёрдой составляющей селевой массы перемещаются во взвешенном состоянии, условия для этого обеспечивает архимедова сила, увеличивающаяся по мере «вовлечения» всё более крупных фракций в состав «вмещающей среды», в которой находятся относительно крупные фракции; по мере увеличения плотности селевой массы и обретения ею вязкопластических свойств, они могут компенсировать уменьшение энергии, используемой потоком для взвешивания в процессе турбулентного и квазитурбулентного перемешивания.

Формирование селей в результате взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами, способных к перемещению на относительно малых уклонах, теснейшим образом связано с противоборством двух сил: силы тяжести и взвешивающей силы. Под взвешиванием твердых частиц понимается процесс, при котором частицы теряют прямой контакт с руслом. Взвешивание частиц изменяет свойства селевой массы, увеличивая ее вязкость, предельное напряжение сдвига и плотность. Изменение плотности приводит к соответственному изменению влекущей и архимедовой сил, уменьшению гидравлической крупности частиц из-за увеличения степени стеснённости их падения, а увеличение вязкости и пластичности – к увеличению сил сопротивления движению потока и уменьшению гидравлической крупности твердых частиц.

Поскольку скорость падения крупных частиц значительно превышает значения поперечных пульсаций скорости селеформирующих водных потоков, перенос крупных частиц водными потоками во взвешенном состоянии не возможен. В КазНИГМИ была выдвинута гипотеза, в соответствии с которой крупные частицы в потоке (в начальной фазе образования селевой массы, когда концентрация твёрдой составляющей незначительна) перемещаются качением самостоятельно за счёт их потенциальной энергии. Эксперименты показали, что частицы, размерами более 200 мм, могут катиться в воздушной среде со скоростью, превышающей скорость продвижения фронта селевого потока, формирующегося в результате водного попуска в естественном селевом очаге с расходом около $10 \text{ м}^3/\text{с}$. Эти данные позволяли считать эту гипотезу правдоподобной [10], в связи с

чем, при расчётах мощности, необходимой для взвешивания частиц, частицы с размерами более 200 мкм не принимались во внимание.

Движение водного потока в локальном селевом очаге, в силу его турбулентности, приводит к взвешиванию частиц, гидравлическая крупность которых меньше вертикальных составляющих скорости потока (более крупные частицы перемещаются путем сальтации и качения). Взвешивание частиц и придание им кинетической энергии сопровождается уменьшением энергии потока. Однако падение частиц приводит к увеличению последней, что в определённой мере компенсирует первоначальные потери. Ход процесса определяется тем, к чему привело взвешивание частиц. Если энергия, отдаваемая частицами, превышает энергию, затраченную потоком на вовлечение их в движение, а увеличение вязкости не привело к существенному росту сил сопротивления движению потока, энергия потока возрастает. Это приводит к дальнейшему росту концентрации твердых частиц в потоке, создавая условия для взвешивания частиц с большей гидравлической крупностью за счет увеличения вертикальных составляющих скорости, вязкости селевой массы и архимедовой силы. Насыщение потока твердой составляющей вследствие турбулентного перемешивания прекращается, когда увеличение концентрации твердых частиц, сопровождаемое ростом вязкости и деградацией турбулентности, приводит к установлению динамического равновесия в фазовом составе селевой массы.

До какой же степени возможно насыщение потока твердой составляющей в результате турбулентного взвешивания частиц? На этот вопрос невозможно ответить однозначно, поскольку решающую роль в описываемом процессе принадлежит минералогическому и гранулометрическому составам селеформирующих пород, расходу потока и характеристикам русла.

Считалось, что взаимодействие водного потока с рыхлообломочными породами не может приводить к образованию селевой массы, объёмная концентрация твёрдой составляющей в которой превышает 50 % (при плотности твёрдой составляющей 2650 кг/м^3 плотность селевой массы равна 1825 кг/м^3) из-за затухания турбулентного перемешивания в потоке.

Так, действительный член Академии наук Армянской ССР И.В. Егиазаров [8], ссылаясь на Р.А. Багнольда, писал: «При концентрации в 35 % турбулентные пульсации совершенно прекращаются. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к «замораживанию», затору всей массы взвешенных наносов, примерно при 57 % по объёму». Известный гру-

зинский исследователь селей канд. техн. наук И.И. Херхеулидзе, базируясь на опытах Р.А. Багнольда, Г.Л. Фриша, Р. Симха и др., считал, что «... наиболее плотная упаковка, при которой еще может иметь место непрерывное движение» составляет 0,52. Примерно такого же мнения придерживался профессор М.С. Гагошидзе: «... селевой поток не может быть турбулентным при объемной концентрации свыше 35...40 % » [7].

Наиболее полно вопросы образования селевой массы при взаимодействии водных потоков с рыхлообломочными породами исследованы действительным членом Академии наук Грузинской ССР М.А. Мостковым. К рассмотрению механизмов формирования селевой массы М.А. Мостков подходил с энергетических позиций. Описывая движение селевых потоков второго рода (турбулентные сели), а под ними он понимал селевые потоки, в которых «... наблюдается отставание скорости движения твердого материала ...», М.А. Мостков считал, что «... вовлечение твердого материала ...» происходит «... как посредством качения по дну, так и путем взвешивания в потоке ...». Исследуя энергетические превращения, сопровождающие движение двухфазных селевых потоков, М.А. Мостков считал возможным ограничиться учетом затрат на:

- перемещение твердой составляющей путем скачкообразного движения и перекачивания;
- поддержание наносов во взвешенном состоянии;
- соударение камней, находящихся во взвешенном состоянии.

В результате анализа, проведенного им, было получено выражение, описывающее зависимость предельной объемной концентрации твердой составляющей в двухфазном селевом потоке от уклона русла:

$$C = \frac{1,21 \sin \alpha}{1 - 2 \sin \alpha}. \quad (4)$$

Важнейшим следствием упомянутой выше модели селеформирования являлась потенциальная возможность насыщения водного потока твердой составляющей (до предела текучести образующейся селевой массы) на уклонах, близких к 18°. Несмотря на то, что М.А. Мостков допускал возможность перехода «... от турбулентного селя к структурному (или ламинарному) ...» [14], а для последних в цитируемой работе не исключалась возможность движения на относительно малых уклонах, это положение не нашло отражения в полученных им уравнениях. Отметим, в частности, что функция, описываемая уравнением (4), монотонна.

Гравитационная теория движения взвешенных наносов члена-корреспондента Академии наук СССР М.А. Великанова распространялась ее автором лишь на потоки с относительно низкой концентрацией твердой составляющей: «... Согласно этой теории, 50 % концентрация определяется как возможный теоретический предел, при котором турбулентный поток в состоянии переносить во взвешенном состоянии твёрдые частицы путём одного лишь поперечного перемешивания жидких масс».

Указывая, что селевая масса «... состоит из воды с растворёнными в ней коллоидными глинистыми частицами, песка, гравия и крупных камней ...», М.А. Великанов считал, что «... активной частью селевой массы надо считать первую составляющую её – глинистый раствор. Концентрация глины в воде, а также относительный объём жидкой составляющей селевой массы определяют в основном динамические свойства селевого потока. Замечательно, что качественное изменение потока с изменением состава селевой массы происходит не непрерывно, а как бы скачком. Этот скачок происходит, когда концентрация близка к 50 % ...» [4].

Рассматривая вопросы кинематики наносонесущего потока, М.А. Великанов обращает внимание на «... одно весьма важное обстоятельство: выражение для вертикального переноса пропорционально произведению двух множителей C и $(1-C)$, а это произведение, как не трудно видеть, имеет максимум для $C = 0,5$. Мы имеем здесь теоретический предел для концентрации переносимых твёрдых частиц: мутность ни при каких условиях не может превышать значения 0,5 (считая, повторяем, в относительном объёме и в рыхлом теле). Это означает, что объём наносов, переносимых турбулентным потоком во взвешенном состоянии, не может превышать половины объёма всего потока (практически предел лежит несколько ниже, по-видимому, около 0,4...0,42). Если представить себе концентрацию наносов, по объёму, превышающую этот теоретический предел, то поток уже не будет в состоянии переносить их во взвешенном состоянии. Мы будем иметь уже не мутный поток, а «оплывину», т.е. полужидкое тело, движение которого подчиняется совсем иным зависимостям» [2].

Член-корреспондент Академии наук Армянской ССР Г.И. Тер-Степанян, анализируя данные о плотности селевой массы, обратил внимание на относительную редкость прохождения селей с плотностью, близкой к 1700 кг/м^3 [18]. Размышления о возможной природе этого явления позволили ему сформулировать гипотезу, согласно которой «... граничное значение объёмного веса (1700 кг/м^3) является некоторым порогом, к ко-

тому селевые массы приближаются с трудом, а пройдя его, приобретают новую способность обогащаться твёрдой составляющей, и, следовательно, от этого порога легко отдаляются». К сожалению, встав на точку зрения авторов, утверждавших, что при приближении плотности селевой массы к $1600...1700 \text{ кг/м}^3$, «... вследствие исчезновения эффекта турбулентности ...» потоки теряют способность к дальнейшему обогащению твёрдой фазой» [18], Г.И. Тер-Степанян пришёл к ошибочному выводу о наличии в процессе селеформирования «гидродинамической фазы развития» [18].

Результаты изучения реологических свойств суспензий и селевых масс, проведённых во второй половине 20 века, показали, что вязкость суспензий, твёрдая составляющая которых представлена однородными по размеру сферическими частицами, даже при их объёмной концентрации 50...60 %, ещё далека от значений, при которых турбулентный режим реальных потоков трансформируется в ламинарный. Ещё меньшее влияние на вязкость суспензий оказывает твёрдая составляющая при её полидисперсном составе [23].

Коренное изменение представлений о роли архимедовой силы, степени влияния концентрации и гранулометрического состава твёрдой составляющей на вязкость селевой массы позволило сделать вывод о главенствующей роли процесса перемещения частиц во взвешенном состоянии при формировании селей большой плотности в результате взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами.

При переносе наносов во взвешенном состоянии, согласно гравитационной теории М.А. Великанова, единичный объём селевого потока располагает мощностью, определяемой выражением

$$N_n = \rho_c g v_n \sin \alpha, \quad (5)$$

где ρ_c – плотность селевой массы [$\rho_c = \rho_T C + \rho_o(1-C)$], ρ_T – плотность твёрдой составляющей селевой массы, ρ_o – плотность воды, C – объёмная концентрация твёрдой составляющей]; g – ускорение свободного падения; v_n – скорость потока; α – угол наклона русла.

Эта мощность затрачивается преимущественно на нагревание селевой массы в процессе молекулярного и атомарного трения, соударение частиц твёрдой составляющей, истирание и дробления твёрдых частиц в составе селевой массы и пород, вмещающих русло, генерацию звуковых и сейсмических волн, перенос частиц во взвешенном и влекомом состояниях и т.д. В связи с этим теоретическое решение задачи определения коэффициента полезного действия потока, как взвесенесущего механизма, далеко

от завершения и наиболее приемлемой считается его оценка по данным об условиях формирования, движения и остановки селей, а также частичного распада селевой массы.

Если η_l – коэффициент полезного действия потока (как взвешенного механизма), то мощность, которой располагает единичный объем потока на взвешивание (при движении в турбулентном режиме) определяется по формуле

$$N_{н.взв} = \eta_l \rho_c g v_{н.турб} \sin \alpha, \quad (6)$$

где ρ_c – плотность селевой массы; $v_{н.турб}$ – скорость движения потока (при турбулентном режиме) $v_{н.турб} = k(H \sin \alpha)^{0,5}$; k – коэффициент Шези; H – глубина потока.

При больших концентрациях твёрдой составляющей вязкость селевых масс достигает значений, при которых, по формальным признакам (числам Рейнольдса), режим течения может характеризоваться ламинарным. Как известно, ламинарный режим течения исключает возможность перемешивания селевой массы и, следовательно, в отсутствие у неё свойства пластичности неизбежен распад селевой массы и затухание селевого процесса. Однако в природных условиях это может и не происходить. Затухание турбулентного перемешивания, обусловленного (по классическим представлениям) суперпозицией различных по размерам вихрей, может компенсироваться перемешиванием, вызываемым так называемыми вторичными течениями. Вторичные течения образуются в результате взаимодействия потоков с руслами, имеющими различные формы и размеры, и являющегося отличительным признаком естественных потоков от изучаемых в технической гидравлике схематизированных призматических потоков. Наличие у русел изгибов приводит к формированию устойчивой поперечной циркуляции, а перегибов – к образованию перекаатов, скоростное поле которых имеет сравнительно беспорядочный характер «... в самом общем виде вторичные течения могут быть или поступательными, направленными круто или полого к главному течению, или вращательными с горизонтальной или вертикальной осью, могут также представлять собой застойные местные вращения, а могут, вращаясь, перемещаться вниз по течению» [3]. Часть энергии таких «квазиламинарных» потоков может использоваться для поддержания частиц горных пород во взвешенном состоянии.

Наблюдения за мощными грязекаменными потоками показали, что при их движении в руслах, имеющих изгибы и перегибы, в результате де-

формации потоков и действия инерционных сил объёма порового пространства между крупными фракциями твёрдой составляющей непрерывно изменяются. Это приводит к «перекачиванию» среды, занимающей поровое пространство, из одного объёма в другой, сопровождающееся перемешиванием этой среды. Подтверждением сказанному является вылет из потока обломков горных пород со скоростями единицы и даже десятки метров в секунду при прохождении селя 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы и искусственно создававшихся селей в 1972...1980 гг. в бассейне р. Шамалган.

Если η_2 – коэффициент полезного действия потока (как взвешивающего механизма), то мощность, которой располагает единичный объём потока на взвешивание (в квазиламинарном режиме) определяется по формуле

$$N_{\text{взв}} = \eta_2 \rho_c g v_{\text{н.лам}} \sin \alpha, \quad (7)$$

где $v_{\text{н.лам}} = \frac{\rho_c g H^2 \sin \alpha}{3\mu}$ – скорость потока в ламинарном режиме; μ – динамическая вязкость селевой массы.

По М.А. Великанову, мощность, которую необходимо затрачивать на взвешивание твёрдой составляющей в единичном объёме, в монографии, опубликованной в 1948 г. [2] определяется как

$$N_{\text{взв}} = g(\rho_T - \rho_o) \cdot \omega_o C(1 - C), \quad (8)$$

где ω_o – гидравлическая крупность частицы, а в монографии, опубликованной в 1964 г. [3], определяется по формуле

$$N_{\text{взв}} = g(\rho_T - \rho_o) \cdot \omega_o C. \quad (9)$$

Приравнивая мощность, которую необходимо затрачивать на взвешивание твердых частиц (в монографии 1948 г., более соответствующей современным представлениям), мощности, которой располагает на взвешивание поток, получим выражение, описывающее зависимость концентрации твёрдой составляющей в селевой массе от угла наклона русла при постоянных значениях глубины потока и коэффициенте полезного действия потока (режим турбулентный).

$$\sin \alpha = \left\{ \frac{(\rho_T - \rho_o) \cdot \omega_o C(1 - C)}{\eta_1 [\rho_T C + \rho_o(1 - C)] k H^{0.5}} \right\}^{0.67}. \quad (10)$$

На рис. 1 приведены результаты расчёта зависимости концентрации твёрдой составляющей в селевой массе (твёрдая составляющая представлена однородными по размеру сферическими частицами) от уклона

русла при принятии гипотезы М.А. Великанова, в соответствии с которой «... 50 % концентрация определяется как возможный теоретический предел, при котором турбулентный поток в состоянии перемешивания жидких масс ... практически предел лежит несколько ниже, по-видимому, около 0,4...0,42» [2]. Нетрудно видеть, что приведённая зависимость однозначна: относительно плотный поток, образовавшийся на определённом уклоне, оказавшись на относительно меньшем уклоне должен трансформироваться (из-за недостатка энергии) таким образом, чтобы его плотность уменьшилась в соответствии с уменьшением уклона.

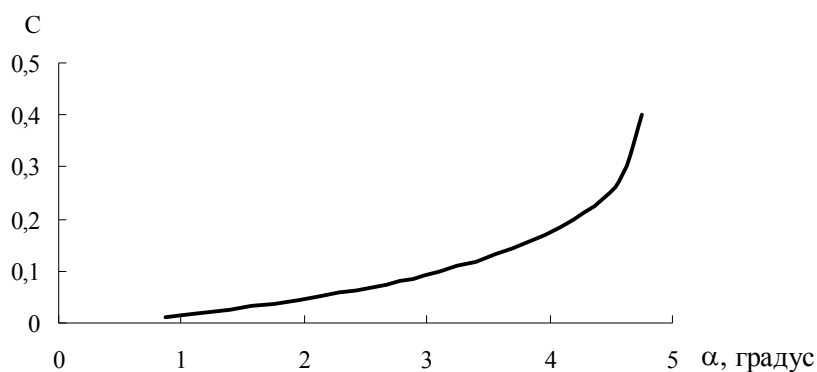


Рис. 1. Зависимость концентрации твердой составляющей в селевой массе от уклона русла (по М.А. Великанову) при $\eta = 0,07$; $\omega_o = 0,1$ м/с; $H = 2$ м.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных во второй половине 20 века, свидетельствовали об ошибочности существовавших ранее представлений о характере влияния концентрации твёрдой составляющей суспензий на их вязкость даже при монодисперсном составе твёрдой составляющей [19]. По Т.С. Чонгу, при 50 % объёмной концентрации твёрдых частиц в суспензии вязкость увеличивается в 12,2 раза по сравнению с вязкостью жидкой составляющей, т.е. вязкость суспензии, образованной смешением воды (температура 5 °С) с твёрдыми частицами ($C = 50$ %) будет равна 0,018 Нс/м². Вязкость такой смеси в 390 раз меньше (при той же температуре) вязкости глицерина, а число Рейнольдса для потока глубиной 1 м и текущего на уклоне 0,05 (около 3°), близко к $5 \cdot 10^5$. При таких числах Рейнольдса режим течения носит турбулентный характер, обеспечивающий перемешивание массы потока и, следовательно, ограничение области применимости гравитационной теории, наложенное ее автором (М.А. Великановым), не правомерно.

Ошибочные представления о характере зависимости гидравлической крупности частиц от степени стеснённости падения частиц, недоучёт того обстоятельства, что относительно крупные частицы находятся не в воде, а в «тяжёлой» жидкости, представленной смесью воды и относительно мелкими частицами. Недооценка роли вязкопластических свойств селевых масс при определении гидравлической крупности частиц и влияния полидисперсности селеформирующих пород на вязкопластические свойства селевых масс и их предельно возможную плотность стали причиной того, что большинство исследователей в 20 веке плотные селевые потоки относили к связным (структурным) потокам, а их движение «... уже выходит за пределы тех движений, которые изучают в гидродинамике. Здесь мы наблюдаем как бы переход к «оплывине», в которой твёрдые составные части передают количество движения друг другу непосредственно ...» [4].

По данным Б.В. Кизевальтера [9], скорость стеснённого падения частиц определяется по формуле

$$\omega_{cm} = \omega_o(1 - C)^j, \quad (11)$$

где j , в зависимости от числа Рейнольдса (применительно к падению частиц), изменяется в пределах 2,39...4,65.

В простейшем случае, когда твёрдые частицы перемещаются во взвешенном состоянии, имеют форму шара, одинаковые размеры и плотность, селевая масса не обладает свойством пластичности, при турбулентном режиме падения частиц и движения потока, зависимость концентрации твёрдой составляющей в селевой массе от уклона русла (Z -функция) описывается уравнением

$$\sin \alpha = \left\{ \frac{(\rho_T - \rho_o) \cdot \omega_o C(1 - C)^{2,39}}{\eta_1 [\rho_T C + \rho_o(1 - C)] kH^{0,5}} \right\}^{0,67}. \quad (12)$$

Зависимость концентрации твёрдой составляющей в селевой массе от уклона русла (при ламинарном режиме падения частиц и турбулентном движении потока) (Z -функция) описывается уравнением

$$\sin \alpha = \left\{ \frac{(\rho_T - \rho_o) \cdot \omega_o C(1 - C)^{4,65}}{\eta_2 [\rho_T C + \rho_o(1 - C)] kH^{0,5}} \right\}^{0,67}. \quad (13)$$

Зависимость концентрации твёрдой составляющей в селевой массе от уклона русла (при ламинарном режиме движения потока и частиц) (Z -функция) описывается уравнением

$$\sin \alpha = \left\{ \frac{3\mu(\rho_T - \rho_o) \cdot \omega_o C(1-C)^{4,65}}{\eta_2[\rho_T C + \rho_o(1-C)]gH^2} \right\}^{0,5}. \quad (14)$$

Анализ приведённых выше математических моделей показал, что концентрация твёрдой составляющей в селевой массе в решающей мере определяется уклоном русла, гранулометрическим и минералогическим составами рыхлообломочных пород, принимающих участие в селеобразовании, глубиной потока. При малых глубинах потоков (менее 1 см) и размерах твёрдых частиц, превышающих 1 мм, зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором поток может существовать без частичного распада и остановки, носит однозначный характер. С увеличением уклона плотность селевой массы возрастает. Из сказанного следует: плотность селевой массы потока, образовавшегося на относительно большом уклоне, при попадании его на участок русла с меньшим уклоном должна уменьшиться либо поток должен остановиться. В такой ситуации (при сохранении всех других параметров неизменными) рассматриваемая функция имеет тот же вид, что и зависимость между уклоном русла и максимальной плотностью селевой массы.

При значениях глубины потока, представляющих практический интерес, и размерах частиц, типичных для селеформирующих горных пород, Z-функция становится не однозначной: в широком диапазоне уклонов русла одному и тому же значению уклона соответствует три значения плотности селевой массы: два устойчивых и одно неустойчивое значение.

Если гранулометрический состав селеформирующих пород представлен несколькими фракциями, то мощность, необходимая для взвешивания различных по размеру частиц, определялась М.А. Великановым [2] по формуле

$$N_{\text{взв}} = g \sum_{i=1}^n (\rho_T - \rho_o) \cdot \omega_i C_i (1 - C_i), \quad (15)$$

где C_i – концентрация i -ой фракции, определяемая как произведение концентрации твёрдых частиц (C), умноженной на долю содержания этой фракции в полном гранулометрическом составе.

С учётом современных представлений о зависимости скорости стеснённого падения частиц от их концентрации и увеличения архимедовой силы, обусловленных полидисперсным составом частиц твёрдой составляющей, уравнение (15) принимает вид

$$N_{\text{эсб}} = g \sum_{i=1}^n (\rho_T - \rho_{s(i-1)}) \cdot \omega_i C_i (1 - C_i)^k, \quad (16)$$

где $\rho_{s(i-1)}$ – плотность среды, включающая воду и все фракции, меньшие i -ой; ω_i – средняя гидравлическая крупность i -ого интервала фракций.

В условиях турбулентного течения потока

$$\sin \alpha = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (\rho_T - \rho_{s(i-1)}) \cdot \omega_i C_i (1 - C_i)^k}{\eta_1 [\rho_T C + \rho_o (1 - C)] k H^{0,5}} \right\}^{0,67}. \quad (17)$$

В условиях квазиламинарного течения потока

$$\sin \alpha = \left\{ \frac{3\mu \sum_{i=1}^n (\rho_T - \rho_{s(i-1)}) \cdot \omega_i C_i (1 - C_i)^k}{\eta_2 [\rho_T C + \rho_o (1 - C)]^2 g H^2} \right\}^{0,5}. \quad (18)$$

Проверка теоретических положений о характере зависимости концентрации твёрдой составляющей в селевой массе от уклона русла (Z -функция) осуществлялась на примере селеформирования в пустыне Жаманкум и селях, формирующихся на северном склоне Иле Алатау (Северный Тянь-Шань).

Целесообразность привлечения характеристик песка пустыни Жаманкум для верификации модели состояния селевого потока обусловлена относительной однородностью размеров частиц: среднее содержание частиц менее 0,1 мм – 11,3 %, а более 0,5 мм – 2,3 %, и тем обстоятельством, что в ходе селевого процесса, вызванного опорожнением накопителя сточных вод, объём которых составлял около 36 млн. м³, было вынесено 36,5 млн. м³ песка. Причём поток перемещался (на уклоне, близком к 0,5°) десятки километров. Содержание глинистых частиц в песках Жаманкум настолько мало, что при концентрации твёрдой составляющей в селевой массе, близкой к таковой на пределе текучести, селевая масса практически не обладает свойством пластичности. Следовательно, частицы песка перемещались на малых уклонах во взвешенном состоянии, обусловленном перемешиванием. Объяснить такой феномен с позиций теории транспорта наносов водными потоками невозможно.

При расчётах гранулометрический состав состоял из двух фракций: 0...0,1 мм и 0,1...0,5 мм, глубина потока принималась равной 2 м,

коэффициент полезного действия потока, как взвесенесущего механизма, принимался равным 7 %.

Кривая состояния селевой массы, показанная на рис. 2, получена путём «склейки» кривых OAB и BC , рассчитанных по формулам (17) и (18). В точке «склейки» кривые разнонаправлены. Скачкообразное изменение режима течения потока вряд ли может найти физическое объяснение. В связи с этим, склейка осуществлена точками так, как это показано на рис. 2, что не противоречит данным наблюдений за прохождением селя по руслу и пойме р. Каскелен вплоть до водохранилища Капчагай, а также физической сути уравнений состояния селевых масс. Важнейшей особенностью обсуждаемой функции является ее неоднозначность. В широком диапазоне изменения плотности селевой массы одному и тому же значению уклона русла соответствует три значения плотности.

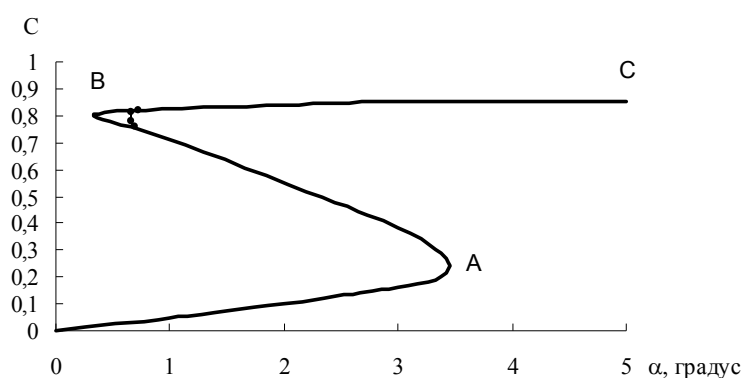


Рис. 2. Кривая состояния селевой массы (гранулометрический состав песков пустыни Жаманкум) при глубине селевого потока 2 м.

На рис. 3 приведена кривая состояния селевой массы, рассчитанная с использованием гранулометрического состава пород бассейна р. Киши Алматы, при глубине селевого потока 2 м. Отрезок OAB построен с использованием формулы (17), а BC – по данным о предельном напряжении сдвига селевой массы, полученным в результате анализа следов прохождения селя 1921 г. по территории г. Алма-Аты, и данным экспериментального определения величин предельного напряжения сдвига селевых масс, типичных для селей северного склона Иле Алатау.

Рис. 2 и 3 иллюстрируют, что кривые состояния обретают отрицательный наклон уже при объёмной концентрации твёрдых составляющих селевых масс менее 0,3, т.е. задолго до трансформации турбулентного режима движения потоков в квазиламинарный.

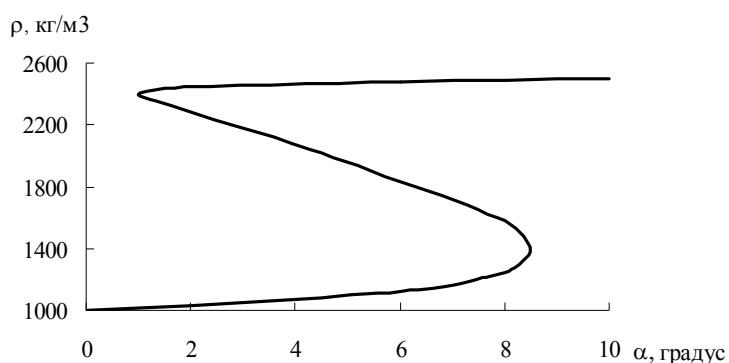


Рис. 3. Кривая состояния селевой массы (гранулометрический состав селеформирующих пород бассейна р. Киши Алматы) при глубине селевого потока 2 м.

Сравнение кривых, приведенных на рис. 2 и 3, показывает, что при превышении критического значения содержания твёрдой составляющей в селевой массе затраты энергии на поддержание твёрдой составляющей во взвешенном состоянии не только не увеличиваются, но даже уменьшаются. Углы наклона русла, при которых происходят эти события, также различны и определяются минералогическим и гранулометрическим составами твёрдой (в том числе формой частиц) составляющей селевой массы и глубиной потока.

Не безынтересен и тот факт, что максимальный угол наклона селевого очага, в котором образовался катастрофический сель после прорыва моренного озера в бассейне р. Сарыкан (Жетысу Алатау) в 1988 г., был близок к 11° , а максимальные размеры глыб приближались к 10 м.

Поддержанию частиц во взвешенном состоянии способствует наличие у большинства селевых масс свойства пластичности, благодаря которому часть (а при большой плотности и 100 %) фракций может находиться в квазивзвешенном состоянии, что уменьшает (исключает) затраты мощности, необходимой для поддержания частиц во взвешенном состоянии. Мощность, необходимая для поддержания частиц во взвешенном состоянии, с учётом влияния пластичности, определяется по формуле

$$N_{\text{взв}} = g \sum_{j=1}^m (\rho_T - \rho_{s(j-1)}) C_j (1 - C_j)^k \omega_{j\tau}, \quad (19)$$

где $\rho_{s(j-1)}$ – плотность суспензии, включающая воду и все частицы в интервале от 1 до (1-j); $\omega_{j\tau}$ – гидравлическая крупность частиц с учётом влияния пластичности сред, в которых они находятся.

Наличие отрицательного наклона у Z-функций позволило теоретически обосновать неизвестное ранее природное явление – явление скачкообразного увеличения плотности селевой массы при превышении уклоном русла критического значения для заданных значений характеристик русла и потока, а также гранулометрического и минералогического составов твёрдой составляющей селевой массы [15].

На рис. 4 приведена Ξ -функция, отражающая зависимость максимально возможных значений плотности селевой массы (при заданных значениях глубины потока и реологических характеристик селевой массы) от уклона русла. Эта кривая получена по данным, приведённым на рис. 3. Из анализа рис. 4 следует, что при превышении (на бесконечно малую величину) уклона русла значения, соответствующего уклону, на котором (см. рис. 3) Z-функции обретает отрицательный наклон, значение плотности увеличивается на конечную величину (функция претерпевает разрыв).

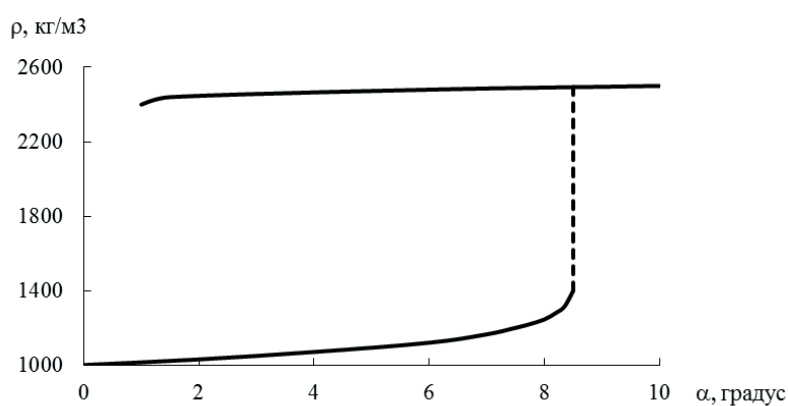


Рис. 4. Зависимость предельно возможной плотности селевой массы (гранулометрический и минералогический составы селеформирующих пород бассейна р. Киши Алматы) от уклона русла при глубине потока 2 м.

С физической точки зрения это означает, что при бесконечно малом (относительно угла $\alpha_{кр}$) увеличении угла наклона русла селевой поток приобретает энергетическую возможность (за конечное время, на конечной длине русла) увеличения плотности селевой массы на конечную величину. Рис. 4 иллюстрирует, что если при угле $\alpha_{кр}$ плотность селевой массы была равна 1350...1370 кг/м³, то при увеличении угла наклона на бесконечно малую величину плотность достигнет (через какое-то конечное время, при наличии рыхлообломочных пород в русле, после продвижения селея на какую-то длину) – станет близкой к предельно возможной (около

2500 кг/м³ – для гранулометрического состава селеформирующих грунтов северного склона Иле Алатау).

На кривой равновесных состояний, имеющей участок с отрицательным наклоном (рис. 5), ветви 1 и 2 представляют собой аттракторы – совокупность точек устойчивого равновесия и совпадают с Ξ -функцией. Ветвь 3 – геометрическое место точек, обозначающих неустойчивое равновесие селевой массы.

Таким образом, Z-функция делит фазовую плоскость (ρ , α) на область распада и область набора, что позволяет прогнозировать эволюцию селевого потока.

Результаты вычислений по описанной выше модели хорошо согласуются с данными наблюдений за прохождением селей в различных физико-географических районах и позволяют осуществлять количественную интерпретацию тех особенностей селевых процессов, которые не находили даже качественного объяснения в рамках общепринятых представлений о селевых явлениях.

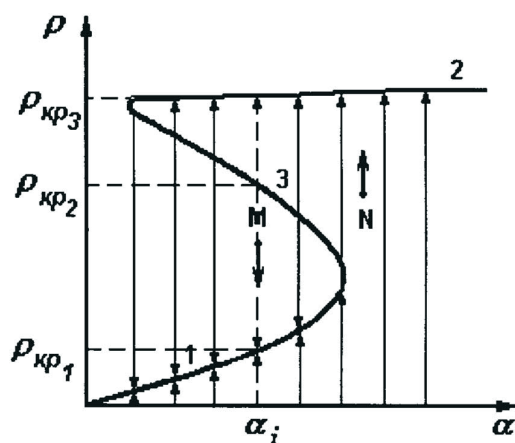


Рис. 5. Кривая равновесных состояний в одномерном фазовом пространстве.

Теория существования селевой массы является ключевым элементом при прогнозе трансформации селевых процессов, поскольку позволяет определять направление эволюции селевого процесса (возможность увеличения или уменьшения плотности селевой массы при изменении морфометрических характеристик пути движения селя) по данным о текущих характеристиках селевого процесса (глубина потока, плотность и реологические характеристики селевой массы, гранулометрический состав её твёрдой составляющей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беручашвили Г.М., Кокориашвили В.И. Некоторые результаты исследования селевых потоков // Труды КазНИГМИ. – 1969. – Вып. 33. – С. 42–62.
2. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 530 с.
3. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 403 с.
4. Великанов М.А. Современные представления о динамической структуре селевого потока // Вопросы геологии Азии. Т.2. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955. – С. 397-403.
5. Виноградов Ю.Б. Сдвиговый селевой процесс и возникновение очагов // Селевые потоки. – 1989. – №2. – С. 27-39.
6. Виноградов Ю.Б. Транспортный и транспортно-сдвиговый процессы // Селевые потоки. – 1980. – №4. – С. 3-19.
7. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 386 с.
8. Егиазаров И.В. Обмен опытом гидравлических исследований лабораторий за рубежом // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. – Т.5. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – С. 255-262.
9. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 296 с.
10. Киренская Т.Л. О критических условиях возникновения эрозионно-сдвигового селевого процесса // Селевые потоки. – 1988. – №10. – С. 31-35.
11. Киренская Т.Л., Степанов Б.С., Хонин Р.В. Селевой поток в бассейне р. Большая Алматинка 19 августа 1975 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1977. – №2. – С. 115-119.
12. Лятхер В.М., Квашилава Н.Г. Механическая модель возникновения селей // Водные ресурсы, 1982. – №3. – С. 96-108.
13. Материалы IV Всесоюзной конференции по селевым потокам / Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959 – 231 с.
14. Мостков М.А. Очерк теории руслового потока. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 224 с.
15. Степанов Б.С. Явление скачкообразного изменения плотности селевых потоков. Заявка на открытие // Селевые потоки. – 1992. – №12. – С. 141-172.
16. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Особенности формирования конусов выноса северного склона Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – 1995. – №3. – С. 18-28.

17. Степанова Т.С. Цепной селевой процесс и образование очагов // Селевые потоки. – 1989. – №11. – С. 43-48.
18. Тер-Степанян Г.И. О критерии перехода несвязных селей потоков в связанные сели // Селевые потоки и горные русловые процессы. Сб. докл. на X Всесоюзной селевой конференции. – Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1968. – С. 339-340.
19. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. – М.: Мир, 1976. – 630 с.
20. Яфязова Р.К. К определению уравнильного уклона отложений селей в селехранилищах // Вестник КазАТК. – Алматы, 2008. – №5 (54). – С. 10-14.
21. Яфязова Р.К. Объем конуса выноса как показатель селевой активности // Гидрометеорология и экология. – 2002. – №2. – С. 90-99.
22. Bagnold R.A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in Newtonian Fluid under shear // Proc. Royal Society of London. – London, 1954. – Vol. 225 – A, Aug. – P. 50-63.
23. Farris R.T. Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data // Trans Soc. Rheol. – 1968. – Vol. 12. – P. 81-301.
24. Takahashi T. Debris Flow // Ann, Rev. Fluid Mech. – 1981. – Vol. 13. – P. 57-77.
25. Takakashi T. Mechanical characteristics of debris flow // Proc. of ASCE. – 1978. Vol. 104 HY 8. – P. 1153-1169.

Поступила 28.06.2013

Геогр. ғылымд. докторы Б.С. Степанов

БАТПАҚТЫ ТАС СЕЛДЕРДІҢ ТАБИҒАТЫ

Жалпы түсінік бойынша, сел салмағының тығыздығы арна еңістігімен анықталады. М.А. Великановтың гравитациялық теориясының дамуы, тәжірибе жүзінде арна еңісінің бір мағынасына екі тұрақты және бір тұрақсыз сел салмағының тығыздығына сәйкес келетінін анықтауға мүмкіндік берді. Осы жағдай табиғатта таныс емес құбылысты ашып берді – арна еңісі өлшемдік мағынасынан асқанда сел салмағының тығыздығы секірмелі түрде өзгереді.