

УДК 551.311.21:624

Доктор геогр. наук Б.С. Степанов \*

**ЯВЛЕНИЕ СКАЧКООБРАЗНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ СЕЛЕВОЙ МАССЫ. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ЕГО ОТКРЫТИЯ***СЕЛЬ, ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ПЛОТНОСТЬ СЕЛЕВОЙ МАССЫ, ВЯЗКОСТЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ, ГЛУБИНА ПОТОКА, НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ, РАЗРЫВ, ТРАНСФОРМАЦИЯ, РАСЧЁТ*

*Характер трансформации характеристик селей не зависит от генезиса и механизма их формирования. Открытие явления скачкообразного изменения плотности селевой массы, позволило разработать научно обоснованный метод расчета характеристик селей. Трансформация характеристик селя определяется расходом и морфометрией пути его движения, реологическими характеристиками селевой массы.*

**Введение**

Условия формирования грязекаменных потоков в результате взаимодействия сосредоточенных водных потоков с селеформирующими рыхлообломочными породами могут быть самыми различными. Мощные сели образуются в результате слияния множества микроселей, формирующихся на крутых склонах водосборов, а также трансформации крупных сосредоточенных водных потоков в сели при их взаимодействии с рыхлообломочными породами в руслах постоянных или временных водотоков, уклон которых превышает критическое значение для заданных гранулометрического и минералогического составов селеформирующих пород.

В первом случае это происходит в результате выпадения жидких ливневых осадков на эродированные поверхности, наклон которых, как правило, превышает угол естественного откоса селеформирующих пород, находящихся в рыхлом состоянии. Роль воды заключается преимущественно в уменьшении сцепления между частицами, а их сдвиг происходит в результате действия гравитации.

Во втором случае образование селевой массы может происходить на значительно меньших уклонах, поскольку вовлечение пород в селеоб-

---

\* РГП «Казгидромет», г. Алматы

разование происходит в результате эрозионных процессов, при которых кинетическая энергия сначала водного (а затем и двухфазного) потока играет важную роль в процессе преодоления сил сцепления и придания частицам первичного импульса.

Поскольку конечная плотность селевой массы определяется интенсивностью и продолжительностью вовлечения рыхлообломочных пород в процесс селеобразования, в первом случае её величина определяется интенсивностью осадков (в частности размерами капель), скоростью размывания пород, наклоном и длиной эродированных поверхностей.

Во втором случае интенсивность вовлечения определяется уклоном, длиной и формой русла, расходом потока, эродирующей способностью селевой массы, устойчивостью грунта к эрозии и сдвигу под действием силы тяжести, наличием селеформирующих пород и т.д.

В связи с многообразием упомянутых характеристик, расход потоков, плотность и реологические характеристики масс, их образующих, при выходе потоков из зон (назовём их условно очагами селеформирования), где по условиям формирования плотность селевой массы могла возрастать до предельно возможных значений, могут быть существенно различными.

При выходе из очагов селеформирования сели попадают в горные долины, на конусы выноса, предгорные равнины, геоморфологические и геологические характеристики которых существенно отличаются от очагов селеформирования. При движении по горным долинам сели могут сливаться с водными потоками, при этом реологические характеристики их масс могут претерпевать существенные изменения.

Что же будет происходить с селями за пределами очагов селеформирования: их расход и объём, плотность селевой массы будут увеличиваться за счёт дальнейшего вовлечения рыхлообломочных пород в селеобразование или они будут уменьшаться вследствие частичного распада селевой массы? Ответы на эти вопросы, имеющие большую теоретическую и практическую значимость, призвана давать теория существования селевой массы.

### **1 Транспорт наносов и сели**

Одним из результатов взаимодействия водных потоков с горными породами, вмещающих русло потока, является вовлечение их в движение. Как правило, плотность таких пород превышает плотность воды и для их перемещения требуется затрата части кинетической энергии водной составляющей потока. Процесс перемещения горных пород, при котором

для этого требуется существенная затрата энергии со стороны водной составляющей потока, называется транспортом наносов. Частицы горных пород могут перемещаться во взвешенном состоянии, скачкообразно, качением и скольжением. На относительно малых уклонах, когда перемещение наносов происходит скачкообразно, качением и скольжением за счёт энергии водной составляющей потока, скорость перемещения частиц горных пород меньше скорости течения воды, это и обеспечивает возникновение движущей силы.

Установлено, что основная часть энергии потока затрачивается на перемешивание воды, в ходе которого происходит диссипация (трансформация кинетической энергии в тепловую). Перемешивание в потоке обусловлено как турбулентностью, так и вторичными течениями, в частности, поперечной циркуляцией, возникающей на изгибах и на перегибах русла, обтекании массивных выступов, образованных валунами и глыбами (крупными фракциями селеформирующих пород), а при очень больших концентрациях твёрдой составляющей потока, при наличии твёрдых частиц, соизмеримых по размерам с глубиной потока, при изменении их взаимного расположения в ходе деформации потока, в результате чего происходит «перекачка» среды, вмещающей крупные фракции, из одного объёма пористого пространства (образуемого крупными частицами) в другой.

Транспорт наносов является предметом гидрологии, изучающим весь комплекс вопросов, относящихся к деятельности воды на земной поверхности. В силу своей молодости и потребности общества, гидрология уделяла основное внимание процессам, происходящим на относительно малых уклонах. Следствием незначительности уклонов являлась малая концентрация твёрдой составляющей двухфазных потоков. При таких концентрациях плотность, вязкость и пластичность среды мало отличаются от таковых воды и необходимость в их учёте при расчёте характеристик потоков, имеющих практическую значимость, отсутствовала.

Освоение в больших масштабах горных территорий столкнулось с необходимостью разработки методов управления процессами, ранее не изучавшимися в гидрологии, в частности, с селевыми процессами. Представляется очевидным, что с увеличением уклона русла возрастает и энергия потока, а, следовательно, и энергия, которая может быть затрачена на перемещение твёрдой составляющей селевой массы. Увеличение концентрации твёрдой фазы в селевой массе приводит к столь значительному изменению её реологических свойств, что методы расчёта характеристик

водных потоков оказались непригодными для расчёта характеристик селей. Попытки модернизации методов, использовавшихся в гидрологии для расчёта характеристик наносонесущих потоков, оказались малопродуктивными, поскольку считалось, что при концентрации твёрдой составляющей в смеси, превышающей 35...50 %, турбулентное перемешивание становится невозможным.

Существенный вклад в понимание природы селей внесли представители геологической науки, изучавшие природу устойчивости аномально увлажнённых массивов рыхлообломочных пород. Сдвиг и разжижение таких массивов могли приводить к формированию грязевых и грязекаменных потоков, движение которых по руслам постоянных и временных водотоков (без нарушения их сплошности) с полным основанием может трактоваться как сель. Плотность массы таких селей могла превышать  $2000 \text{ кг/м}^3$ . Однако методы расчёта, разработанные в инженерной геологии, позволяли оценить лишь вероятность и масштабы сдвиговых явлений. Вопросы, связанные с расчётом скорости, глубины потоков, дальности их продвижения, трансформации этих и других характеристик, обусловленных изменением реологических свойств селевой массы при смешении её с водой или руслообразующими горными породами, не являлись предметами изучения наук геологического профиля.

Вышесказанное привело к тому, что к середине 20 века господствовало представление о существовании двух типов селей: турбулентных (плотность массы которых не могла превышать  $1600...1800 \text{ кг/м}^3$ ) и грязекаменных (плотность  $2000 \text{ кг/м}^3$  и более).

Однако такое мнение разделялось не всеми исследователями селевых явлений. Так, геолог Г.В. Иванов, занимавшийся проходкой геолого-разведочных канав на крутых склонах путём водных попусков по предварительно подготовленным направляющим канавкам, утверждал, что в результате взаимодействия кратковременных водных попусков (с объёмами  $25...50 \text{ м}^3$  и расходами до  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  на уклонах  $0,17...0,60$ ) с породами, вмещающими образующееся русло, формируются грязекаменные сели с объёмами  $100...150 \text{ м}^3$ . Доклад, сделанный им на IV Всесоюзной конференции по селевым потокам подвергся критике со стороны Председателя селевой комиссии при АН СССР члена-корреспондента АН СССР, профессора МГУ М.А. Великанова: «... докладчик не понял, что надо сначала показать сходство структуры потоков, образующихся в геологоразведочных канавах с естественными селями; а уже потом на этом сходстве (кото-

рое может оказаться лишь частичным) обосновать метод качественного моделирования селей» [7].

Возможность существования селей с плотностью, превышающей плотность воды, но меньшей, нежели плотность твёрдой составляющей селевой массы, следовала и из работы академика АН Грузинской ССР М.А. Мосткова. Им предложена формула связи максимально возможной плотности селевой массы с уклоном русла.

На рис. 1 приведены кривые, отображающие, по мнению И. Штини, М.А. Мосткова и Т. Такахаши, зависимость предельной объемной концентрации твердой фазы в селевой массе от уклона очага селеобразования. Несмотря на существенное различие в форме кривых, они относятся к одному и тому же классу монотонных и непрерывных функций. При прогнозе развития селевых процессов указанное обстоятельство играет важную роль. Физическая интерпретация обсуждаемых зависимостей однозначна: концентрация твердой фазы в массе потока «... большая, нежели ... значение, определяемое соотношениями между уклоном и предельной концентрацией ... невозможна ...» [9]; другими словами, при перемещении потока с плотностью  $\rho_1$  (образовавшегося на уклоне  $i_1$ ) на уклон  $i_2$  ( $i_1 > i_2$ ) неизбежен частичный распад селевой массы до соответствующего данному уклону значения плотности  $\rho_2$  ( $\rho_2 < \rho_1$ ).

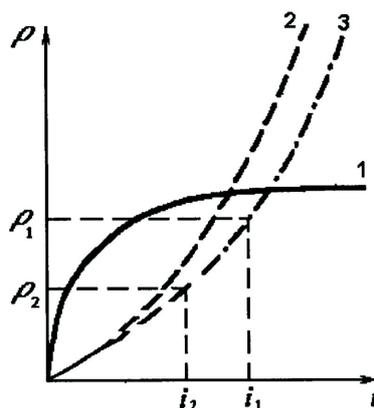


Рис. 1. Зависимость максимально возможной плотности селевой массы от уклона русла (1 – по И. Штини; 2 – по М.А. Мосткову; 3 – по Т. Такахаши).

Функции, описывающие эти зависимости, непрерывные, т.е. бесконечно малому изменению уклона соответствует бесконечно малое изменение концентрации твёрдой составляющей, а, следовательно, и плотности

селевой массы. Формула М.А. Мосткова носила гипотетический характер, поскольку при её выводе использовались не только фундаментальные физические законы, но и данные экспериментальных наблюдений (преимущественно качественного характера). В связи с этим, она не нашла практического применения.

Впервые возможность постепенной трансформации водного потока в грязекаменный сель в природном селевом врезе, образованном в древней морене в результате опорожнения высокогорного водоёма, в масштабах, соответствующих формированию катастрофического селя (расход воды –  $25 \text{ м}^3/\text{с}$ , расход образовавшегося селя –  $420 \text{ м}^3/\text{с}$ , плотность селевой массы до  $2400 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), была доказана при проведении экспериментов по воспроизведению селей на Чемолганском полигоне Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института в 1972...1978 гг. [1].

Полученные в природных условиях данные были подтверждены при формировании катастрофического селя 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы (Малой Алматинки) (северный склон Иле (Заилийского) Алатау), возникшего в результате опорожнения поверхностного водоёма, образовавшегося на леднике Туюксу. Водный поток с максимальным расходом около  $300 \text{ м}^3/\text{с}$  трансформировался в грязекаменный сель с расходом 10...15 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$ . Сель был задержан в селехранилище, образованном плотиной в урочище Медеу [3].

Характеристики селевой массы этого селя (плотность, гранулометрический состав твёрдой составляющей) практически не отличались от таковых селя, сформировавшегося в бассейне этой же реки в 1921 г. и разрушившего восточную часть г. Верного (Алматы). Этот сель несколькими потоками прошёл по конусу выноса вплоть до его периферии, углубляя вновь формирующееся русло на 2...3 м в верхней трети конуса (при этом плотность селевой массы возрастала). По мере растекания селя по поверхности конуса выноса, его глубина уменьшалась. Глыбы, размеры которых превышали глубину потоков, постепенно останавливались; и на периферийной части конуса выноса, где уклон уменьшался до 0,017...0,008, происходило отложение селевой массы, максимальные размеры частиц которой не превышали 0,2...0,3 м.

Таким образом, исследователи селей в 1972...1973 гг. получили неопровержимые данные о том, что грязекаменные сели с плотностью 2300...2400  $\text{кг}/\text{м}^3$ , формирующиеся в результате взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами, вмещающими их русла (на укло-

нах, близких к  $17^\circ$ ), перемещаются на расстояния в десятки километров и отлагаются на конусах выноса, углы наклона которых составляют первые единицы (и даже доли) градуса.

## **2 О моделировании условий существования селевой массы**

В предшествовавший период времени первостепенную важность при разработке теории селей имело выявление зависимости максимально возможной плотности турбулентных селей (концентрация твёрдой составляющей менее 50 %) от уклона русла. В соответствии с существовавшими в то время теоретическими представлениями эта зависимость была однозначной и не могла превышать (при средней плотности пород, участвовавших в селеобразовании,  $2650 \text{ кг/м}^3$ )  $1825 \text{ кг/м}^3$ .

Плотность селей, формирующихся в результате потери устойчивости массивов обводнённых горных пород, определяется плотностью пород и содержанием в порах воды. Образующаяся селевая масса, как правило, обладает пластическими свойствами в мере, обеспечивающими перемещение частиц всех размеров в квазивзвешенном состоянии; возможность её перемещения на малых уклонах подтверждалась фактическими данными. Теоретическое определение плотности и возможности перемещения селевой массы не представляло какой либо сложности.

Как показали эксперименты 1972...1978 гг. на Чемолганском полигоне и результаты выявления причин формирования селей 1921 и 1973 гг. в бассейне р. Киши Алматы, перемещение плотной селевой массы, образующейся при взаимодействии водного потока с рыхлообломочными породами, при наклоне пути движения доли-первые единицы градуса свидетельствует о неоднозначной зависимости между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором она может перемещаться без остановки и частичного распада. Неоднозначность упомянутой зависимости, коренным образом изменявшей существовавшие ранее представления о ходе селевых процессов, требовала объяснения.

В условиях мысленного эксперимента, в первом приближении, связь между уклоном лотка и максимально возможной плотностью селевой массы можно установить следующим образом. Дно «бесконечно» длинного лотка, с шириной на два порядка превышающей глубину потока, а наклон которого можно изменять, выстилается рыхлообломочными породами. В свою очередь, глубина потока должна превышать, как минимум, размер максимальной частицы рыхлообломочных пород, принимающих участие в селеформировании. Глубина потока (вне зависимости от

концентрации твёрдой составляющей образующейся смеси) автоматически поддерживается постоянной путём изменения ширины потока. Лотку придаётся заданный уклон.

На вход лотка подаётся вода с расходом, обеспечивающим заданную глубину водного потока. Отбор пробы образовавшейся смеси (на плотность) осуществляется на таком удалении от начала лотка, на котором уровень потока (расход которого увеличится за счёт вовлечение в движение частиц грунта) стабилизируется.

Определяется плотность образовавшейся смеси. Значение плотности соответствует заданным значениям гранулометрического и минералогического составов рыхлообломочных пород, уклона лотка и глубины потока. Изменяя упомянутые выше характеристики, можно получить данные для оценки зависимости максимально возможной плотности селевой массы от уклона пути движения потока для различных значений его глубины, гранулометрического и минералогического составов твёрдой составляющей селевой массы.

В условиях мысленного эксперимента, в первом приближении, связь между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором она перемещается без остановки и частичного распада, можно установить следующим образом.

Установка должна состоять из смесителя, обеспечивающего равномерное распределение рыхлообломочных пород и воды в смеси, и подачи образующейся смеси и лоток с расходом, при котором поток имеет заданную величину глубины. Конструкция лотка такая же, как и в проведении выше описанных экспериментов, однако дно лотка рыхлообломочными породами не выстилается.

На вход лотка, имеющего уклон не менее 0,5, подаётся селевая масса с заданными характеристиками. На выходе из лотка значение плотности массы может измениться или остаться неизменным. Целью экспериментов является определение минимальных уклонов лотка, на которых, при заданных значениях плотности смеси и глубины потоков, плотность смеси не уменьшается. Изменяя минералогический и гранулометрический составы рыхлообломочных пород, плотность смеси и глубину потока, можно получить данные для оценки зависимости между плотностью смеси и минимальным уклоном, на котором эта смесь может перемещаться без остановки и распада.

### 3 Аксиоматическое доказательство возможности существования неоднозначной зависимости между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором селевая масса может существовать без частичного распада или остановки

Как отмечалось выше, эксперименты на Чемолганском полигоне, а также данные о низкой плотности потоков, формирующихся на относительно малых уклонах (менее 0,05) поверхностей, сложенных грунтами, содержащими частицы с размерами от долей микрон до нескольких метров, свидетельствуют о том, что зависимость между плотностью селевой массы и уклоном пути движения потоков неоднозначна. Уровень знаний, накопленных к последней четверти 20 века об условиях формирования селей и свойствах селевых масс, позволил постулировать следующие положения.

1. Сосредоточенный водный поток, с расходом выше критического значения, при определённых условиях (уклон пути движения превышает критическую величину, достаточный объём селеформирующих пород, содержащих частицы от пылевато-глинистых до валунов и глыб, неограниченная длина пути движения потока) трансформируется в грязекаменный поток с плотностью селевой массы, близкой к средней плотности селеформирующих пород.
2. Мощные селевые потоки большой плотности ( $2300 \dots 2500 \text{ кг/м}^3$ ), твёрдый компонент которых представлен полидисперсными частицами, включающими валунно-глыбовые фракции, не образуются на относительно малых уклонах ( $0,017 \dots 0,05$ ).
3. Селевой процесс, как отклик сложной системы «русло (очаг) – поток», при постоянном уклоне русла (очага), конечных значениях продолжительности процесса и пути движения стремится к динамическому равновесию, которое характеризуется таким состоянием селевой массы, при котором не происходит изменения её плотности.
4. Селевая масса, обладающая пластическими свойствами в мере, достаточной для того, чтобы все частицы её твёрдой составляющей находились в квазивзвешенном состоянии, перемещается без распада и остановки при выполнении условия

$$H > \frac{\tau_0}{\rho_c g \sin \alpha} .$$

5. Реологические свойства селевых масс (вязкость, предельное напряжение сдвига) и скорость их распада являются непрерывными функциями плотности селевых масс.

Придание этим положениям статуса аксиом позволяет доказать наличие отрицательного наклона у кривой равновесных состояний для вязкопластической селевой массы. Утверждение, подлежащее доказательству, формулируем следующим образом: зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором сели перемещаются без распада и остановки, имеют участок с отрицательным наклоном, если гранулометрический и минералогический составы твердой составляющей таковы, что селевые смеси при большой плотности обладают пластическими свойствами в мере, достаточной для того, чтобы частицы (вплоть до валунов и глыб) находились в квазивзвешенном состоянии.

Для доказательства приведенного выше утверждения допустим, что зависимость между плотностью селевой массы (отрезок  $OAC$ , рис. 2, для  $H = \text{const}$ ) и минимальным уклоном, на котором селевая масса перемещается без распада и остановки, описывается однозначной функцией  $\rho = \rho(i)$ , причем  $\frac{\partial \rho}{\partial i} > 0$ , что не противоречит первому, второму и третьему положениям.

При этом точка  $C$  соответствует плотности селевой массы, при которой последняя теряет свойство текучести: дальнейшая деформация происходит с разрывом сплошности, сел трансформируется в оползень.

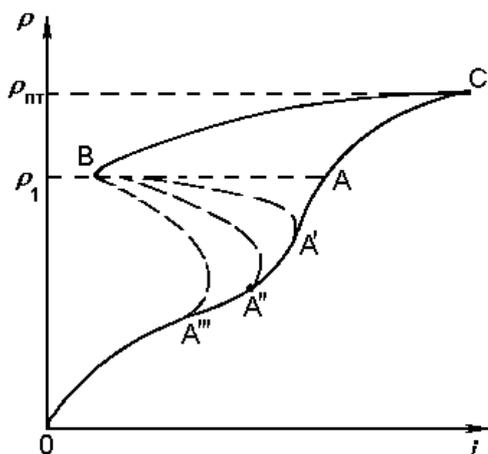


Рис. 2. К доказательству существования отрицательного наклона у кривой равновесных состояний.

В то же время, согласно четвертому положению (в условиях проявления у селевых масс пластических свойств), имеет место функция, изображенная на рис. 2 кривой  $BC$  ( $H = \text{const}$ ) и отображающая зависимость между

плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором селевая масса еще не останавливается.

Поскольку

$$\sin \alpha > \frac{\tau_0}{\rho_c g H},$$

нетрудно сделать вывод о том, что изменением величины  $H$  легко добиться, чтобы значение  $\sin \alpha$  принимало сколь угодно малое значение. Именно это значение  $H$  и принимается при построении кривых  $OAC$  и  $BC$ .

Анализ положения кривых  $OAC$  и  $BC$  на координатной плоскости ( $\rho$ ,  $i$ ), приводит к выводу, что функция  $\rho = \rho(i)$  в диапазоне плотностей  $\rho_1 \div \rho_{mn}$  характеризуется ветвями  $AC$  и  $BC$ . Поскольку искомая функция – зависимость между плотностью селевых масс и минимальными уклонами, на которых последние существуют без остановки и распада, представляется очевидным, что отрезок  $AC$  не может принадлежать искомой функции. В указанном диапазоне плотности селевой массы она характеризуется ветвью  $BC$ .

Остается решить вопрос о характере перехода отрезка  $OA$  в отрезок  $BC$ . Поскольку скачкообразный переход функции  $\rho(i)$  из точки  $A$  в точку  $B$  запрещен пятым положением (свойства селевой массы не могут изменяться на конечную величину при бесконечно малом изменении их плотности, т.е. скачкообразно), функция  $\rho(i)$ , не доходя до точки  $A$ , постепенно переходит в функцию, изображенную отрезком  $BC$ . Например, как это изображено штрихпунктиром на рис. 2, образуя участок с отрицательным наклоном, что и требовалось доказать.

Характер перехода отрезка  $OA'$  ( $OA''$ ,  $OA'''$ , ...) в отрезок  $BC$  определяется параметрами потока и закономерностями изменения свойств селевой массы по мере увеличения ее плотности. Участок  $AC$  появляется в случаях, когда преваляющая роль в сопротивлении движению селевых смесей играют кулоновские силы, либо увеличение концентрации взвешенных частиц приводит к интенсивному гашению турбулентного перемешивания, что характерно для потоков, имеющих малые глубины. Естественно, при этом исчезает ветвь  $A'BC$ .

Результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие о неоднозначной зависимости плотности селевой массы от минимального уклона, на котором не происходит частичный распад селевой массы или её остановка, приведены в монографии [9].

С учётом современных представлений о зависимости скорости стеснённого падения частиц от их концентрации и увеличения архимедовой силы, обусловленной полидисперсным составом частиц твёрдой компоненты, в условиях турбулентного течения потока зависимость между плотностью (концентрацией твёрдой фазы в селевой массе) селевой массы и минимальным уклоном, на котором она может существовать без распада и остановки, при глубинах потоков, представляющих практический интерес, имеет вид [8]

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

где  $\rho_T$  – плотность частиц твёрдой фазы;  $\rho_s(i-1)$  – плотность среды, включающей в себя воду и все фракции, меньшие  $i$ -той;  $\omega_i$  – средняя гидравлическая крупность  $i$ -того интервала фракций;  $C$  – объёмная концентрация твёрдой фазы в селевой массе;  $\eta$  – коэффициент полезного действия;  $\rho_o$  – плотность воды;  $k$  – коэффициент Шези;  $H$  – глубина потока.

#### 4 К теории существования селевой массы

Совокупность результатов теоретического и экспериментального изучения зависимости между плотностью селевой массы (для различного гранулометрического и минералогического составов её твёрдой составляющей, различной глубины потоков) и минимальным уклоном, на котором её движение происходит без частичного распада и остановки, легла в основу теории существования селевой массы.

Теория существования селевой массы позволяет ответить на вопросы, возникающие при оценке процессов, имеющих место при выходе селей на относительно малые уклоны (горные долины, конусы выноса). Ранее считалось, что при движении селей на таких уклонах расходы и объёмы селей уменьшаются экспоненциально [2], либо их уменьшение происходит по мере «размазывания» селевой массы. В последнем случае скорость изменения характеристик селей определяется морфометрическими характеристиками пути движения селей, их расходом и объёмом, а также реологическими характеристиками селевой массы.

В модели Ю.Б. Виноградова реализован принцип экспоненциального истощения расхода и объема селей. В соответствии с этой концепцией автор модели предполагал, что при угле наклона  $\alpha > \alpha_{кр}$  «... снижение

расхода селевой массы на единицу пути движения потока прямо пропорционально самому расходу ( $Q_c$ ) и ширине дна долины ( $B$ ) и обратно пропорционально отношению разности напряжений движения ( $F_v$ ) и торможения ( $F_\phi$ ) к давлению селевой массы на горизонтальную площадку ( $F_g$ ).

Результаты расчетов, выполненных с помощью модели Ю.Б. Виноградова, приведены на рис. 3. Бросается в глаза сильная зависимость искомых величин от коэффициента пропорциональности  $c_2$ , рекомендаций по принятию которых автором модели не приводится; в той же мере это относится и к разности  $(tg\alpha - tg\varphi)$ .

Очевидным недостатком модели является независимость характера истощения объема селей от их исходных значений. Такая закономерность приводила бы к тому, что уклон долин изменялся также по экспоненте. Гипотеза о независимости характера истощения объема селей от их исходных значений противоречит и данным наблюдений за развитием селевых явлений в различных физико-географических и геологических условиях.

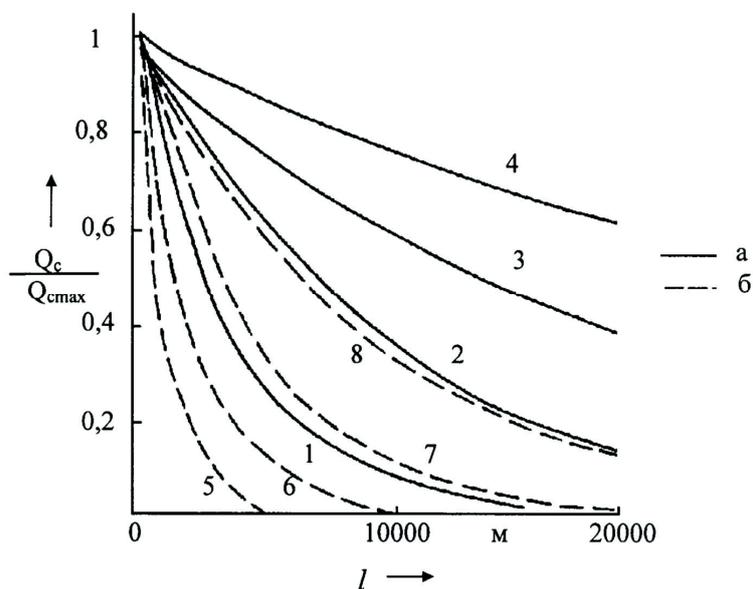


Рис. 3. Характер трансформации селевого потока по Ю.Б. Виноградову.

$a - (C_2 = 10^7)$ ;  $b - (C_2 = 4 \cdot 10^7)$ ; 1, 5 —  $[(tg\alpha - tg\varphi) = 0,02]$ ; 2, 6 —  $[(tg\alpha - tg\varphi) = 0,05]$ ; 3, 7 —  $[(tg\alpha - tg\varphi) = 0,1]$ ; 4, 8 —  $[(tg\alpha - tg\varphi) = 0,2]$ .

Представления об условиях формирования и трансформации характеристик селей Т. Такахаша [11] практически не отличаются от концепции Ю.Б. Виноградова. Критический уклон, разграничивающий про-

цессы обогащения смеси твердой составляющей от процессов частичного распада смесей, определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(\rho_T - \rho_0) \cdot C \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{дин}}}{(\rho_T - \rho_0) \cdot C + \rho_0}.$$

В.И. Тевзадзе разработана модель трансформации характеристик селей в ситуациях, когда селевые смеси обладают ярко выраженными пластическими свойствами [10]. Трансформация связного селевого потока «... сводится к следующим основным фазам: «начало движения», «движение по руслу» от верховьев до конуса выноса в транзитной зоне и «остановка» на конусе выноса».

Основным параметром, определяющим условие предельного равновесия селевой массы, В.И. Тевзадзе считает предельное напряжение сдвига ( $\tau_0$ ). В работе [10] он предлагает, вслед за П.П. Мосоловым и В.П. Мясниковым [10], для описания предельного равновесия использовать методы вариационного исчисления. Этот подход, считает Тевзадзе, позволяет определить границы застойных зон при заданном градиенте давления и известном предельном напряжении сдвига ( $\tau_0$ ) и, наоборот, зная физико-механические свойства массы и контур страгивания, определить уклон предельного равновесия. Им были проведены опыты на лотках различной формы, которые удовлетворительно подтвердили теоретические выводы. К сожалению, такого набора исходных параметров в реальных условиях мы не имеем. Форма гидрографа в начальном створе задается в виде «падающей ветви кривой Гаусса», а для упрощения расчетов аппроксимируется прямой  $Q = a - bt$ . При движении вниз по руслу связной селевой массы происходит потеря определенной части расхода ( $q$ ) от хвостовой части потока в силу наличия сопротивления сдвигу ( $\tau_0$ ).

Остановка связного селевого потока происходит в результате постепенного затухания скорости из-за уменьшения глубины и уклона русла; при известной плотности селевой смеси глубина остановившегося слоя равна:

$$H = \frac{\tau_0}{\rho_c g i}.$$

Анализ модели В.И. Тевзадзе показывает, что она описывает трансформацию характеристик узкого класса селей, поскольку описывается поведение сугубо вязкопластичных сред. Она предполагает исходными,

а, следовательно, известными, такие важнейшие характеристики селевых смесей как плотность, предельное напряжение сдвига (или контур страгивания). Кроме того, предполагается постоянство перечисленных характеристик во времени и пространстве, хотя известно, что они чрезвычайно мобильны. Главным недостатком модели, по мнению автора, является то, что в ней не предусмотрена возможность возрастания расхода и объема селей по мере их движения вследствие захвата потоком горных пород, слагающих русло.

Из теории существования селевой массы следует, что на относительно малых уклонах расход и объем селя может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от морфометрических характеристик пути движения селя, его расхода, плотности селевой массы и её реологических характеристик. Учёт этого обстоятельства имеет исключительно важное практическое значение.

К сколь серьезным последствиям приводят неправильная оценка характера селевых процессов, базирующаяся на результатах анализа следов прохождения селей, необоснованная схематизация трансформации характеристик селей можно судить на примере мероприятий по защите альплагеря «Джайлык», располагавшегося в бассейне р. Куллумкол-Су (Северный Кавказ).

Жилые и производственные строения лагеря были возведены на конусе выноса р. Куллумкол-Су, заросшего хвойным лесом. В послевоенные годы селевые явления на упомянутой реке наблюдались в 1958, 1961, 1973, 1975 и 1977 гг. ТЭО «Защита альплагеря Джайлык в Кабардино-Балкарской АССР от селевых потоков» было утверждено в 1977 г. Эксперты ТЭО значительно расходились в оценке прогнозируемых характеристик селей в наиболее опасном расчетном створе – вершине конуса выноса. На той стадии проекта для повторяемости 1 раз в 100 лет ( $P = 1\%$ ) были приняты следующие параметры: селевой расход  $Q = 103 \text{ м}^3/\text{с}$ , объем селя  $W_c = 666 \text{ тыс. м}^3$ , объем выносов твердых материалов  $W_m = 114 \text{ тыс. м}^3$ , плотность селя  $\rho_c = 1,3 \text{ т/м}^3$  [6]. Столь малое значение плотности селя, принятое для данного района, обосновывалось характером отложений крупных фракций в береговых валах и полях выносов. Отложения были представлены однородными по размерам глыбами (1...3 м в поперечнике), обращало на себя внимание практически полное отсутствие относительно более мелких фракций в промежутках между упомянутыми глыбами. Именно это послужило основанием для авторов проекта, а вслед

за ними и экспертизе утверждать, что для данного района типичны так называемые водокаменные сели. Дальнейшие рассуждения определялись установившимися стереотипами: концентрация твердой фазы водокаменных селей определяется транспортирующей способностью водных потоков, таковая на углах наклона русел, не выходящих за пределы первого десятка градусов, и реальных расходах паводках незначительна.

В рабочем проекте по защите альплагеря «Джайлык» от селей расчетная вероятность максимальных расходов селя была принята равной  $P = 0,5 \%$ , при этом  $Q_c = 236 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $W_c = 500 \text{ тыс. м}^3$ ,  $W_m = 249 \text{ тыс. м}^3$ ,  $\rho_c = 2,1 \text{ т/м}^3$ . Шел 1982 г. В работах [5, 6], написанных по материалам инженерно-геологических изысканий, выполненных в рамках проекта селезащиты «Джайлыка», обосновывается неизбежность распада «высокоплотной селевой массы», которая могла образоваться на морене ледника Западный Джайлык: «Ввиду малых углов наклона тальвега реки ( $9 \dots 12^\circ$ ) и предельно низкого содержания пылевато-глинистых частиц менее  $0,05 \text{ мм}$  ( $2,7 \dots 5,1 \%$  в «мелкоземном» заполнителе), необходимого для образования суспензии, дальнейшее продвижение высокоплотного селевого потока невозможно».

Оценка характеристик вероятного селя производилась на основе расчетов по модели, приведенной в [5]. Из этой модели следует, что при силе инерции равной нулю, селевая смесь не может перемещаться на уклоне, меньшем, нежели таковой, определяемый из выражения:

$$\operatorname{tg} \alpha_{кр} = \frac{(\rho_T - \rho_0)(1 - W_0)}{\rho_T(1 - W_0) + \rho_0 W_0} \operatorname{tg} \varphi^*, \quad (1)$$

где  $W_0$  – объем жидкой фазы в долях единицы или динамическая пористость селевого потока;  $(1 - W_0)$  – объем твердой фазы в долях единицы.

«Нетрудно заметить, пишут авторы [5], что формула (1), выведенная из условия равномерного движения единичного селевого объема, аналогична формуле Ю.Б. Виноградова, полученной из условия динамического равновесия рыхлообломочной породы ...» «... при  $\alpha > \alpha_{кр}$  будет происходить распад уже сформировавшейся высокоплотной селевой массы».

19 июля 1983 г. в результате выпадения дождя ливневого характера формировался сель, который не только не распался на уклонах  $9 \dots 12^\circ$ , но углубил русло р. Куллумкол-Су на  $10 \dots 12 \text{ м}$  и «... в 8 ч 35 мин вся движущаяся селевая масса отложилась в пределах сооружений лагеря». Последующие четыре селевых вала были для лагеря последними [6].

По иронии судьбы статья, посвященная обоснованию защиты «Джайлыка», в которой утверждалось, что «... Игнорирование трансформации (в нашем случае распада селевой массы), т.е. механический перенос всего рыхлообломочного материала из очага зарождения в расчетный створ (конус выноса р. Куллумкол-Су) сильно исказит, в данном случае завьсит параметры селя и, как следствие, увеличит стоимость селезащитных мероприятий», вышла в свет в 1984 г., т.е. через год после того, как альплагерь перестал существовать.

Теория существования селевой массы позволяет разрешить спорные моменты дискуссии, возникшей после выступления Г.В. Иванова на упоминавшейся выше конференции в г. Алма-Ате 19-23 ноября 1956 г., касающиеся защиты от селевых потоков.

Профессором М.С. Гагошидзе был предложен метод борьбы с грязекаменными (структурными) селями, заключающийся в том, что в боковых «неселевых» долинах должны сооружаться плотины, а накопленная в их верхнем бьефе вода использоваться для разжижения селей, движущихся по главной долине. По мнению М.С. Гагошидзе, разжиженная селевая масса теряет «несущие» свойства и откладывает грубообломочный материал, который придаёт селевой массе большую разрушающую способность [4].

В свою очередь, Г.В. Иванов считал: «Исходя из наших наблюдений, можно не сомневаться, что добавка воды увеличит живое сечение потока и, увеличив подвижность селевой массы, усилит давление на нагорную сторону движущейся каменной гряды и увеличит скорость её движения. Это умножит разрушительную силу потока и позволит ему захватывать в своё движение ещё более крупные камни. М.С. Гагошидзе рекомендует для ликвидации селевого потока воспользоваться как раз тем способом, который мы применяем для создания селевых потоков [7].

Позиция М.С. Гагошидзе была поддержана М.А. Великановым: «Второе моё существенное возражение докладчику (Г.В. Иванову) относится к его полному непониманию предложенного М.С. Гагошидзе метода борьбы разрушительным действием структурных селей. Суть этого метода в том, что связность селевой массы получается лишь при определённом (очень малом) количестве связующей воды: около 15 %. ... Стоит лишь слегка увеличить (например, до 25 %) количество воды и глинистый раствор перестанет связывать массу твёрдых включений, все крупные камни

будут падать, останется лишь небольшой «грязевой ручеёк», совершенно безопасный».

А слова Г.В. Иванова о структурном селе, что после добавления к нему воды он превратится в катастрофический сель, гораздо более разрушительный, есть просто недоразумение. Если в структурном селе вода занимает по объёму около 15 %, то в текучем, наоборот, твёрдая масса составляет 10...20 % всего объёма. Следовательно, для превращения структурного селя в текучий надо увеличить в нём количество воды в 50...60 раз, т.е. не «добавить» ему немножко воды, как предлагает М.С. Гагошидзе, а влить в него новую довольно широкую реку (откуда её взять? И с какой целью?). Докладчик просто ничего не понял» [7].

К сожалению, автор гравитационной теории транспорта наносов М.А. Великанов, ограничил область её применимости относительно низкими концентрациями твёрдой составляющей и поэтому не смог оценить правильность представлений Г.В. Иванова и М.С. Гагошидзе о ходе селевых процессов при изменении содержания воды в селевой массе. Произошло это, прежде всего, потому, что в период создания гравитационной теории транспорта наносов практически отсутствовали данные о степени влияния концентрации твёрдой фазы на величину гидравлической крупности частиц, её гранулометрического состава на вязкость селевой массы и проявление архимедовой силы.

Современная теория существования селевой массы, являющаяся результатом развития теории М.А. Великанова, позволяет ответить на вопросы: в каких ситуациях был прав Г.В. Иванов, а в каких – М.С. Гагошидзе, как будет развиваться селевой процесс при изменении уклона русла и плотности селевой массы, глубины потока и гранулометрического состава твёрдой составляющей селевой массы.

На рис. 4 представлена зависимость между плотностью (концентрацией твёрдой фазы) селевой массы и минимальным уклоном (глубина потока постоянная), на котором она может существовать без распада и остановки, а так же приведены примеры, поясняющие, как изменяется ход селевых процессов в различных ситуациях.

Кривая *OABC*, характеризующая обсуждаемую зависимость (для конкретных значений глубины потока, гранулометрического и минералогического составов твёрдой составляющей селевой массы), состоит из трёх участков: *OA* и *BC* – участки устойчивого состояния селевой массы и *AB* – участок неустойчивого состояния селевой массы. Ход селевого процесса

определяется тем, больше или меньше величина плотности селевой массы относительно значений плотности в точках, лежащих на кривой  $OABC$  при различных уклонах пути движения селя.

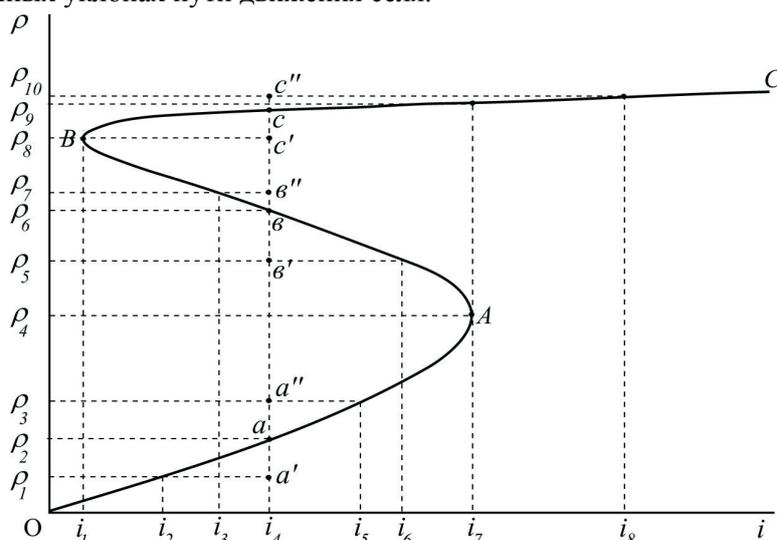


Рис. 4. Характерная форма кривой зависимости между плотностью (концентрацией твёрдой фазы в селевой массе) селевой массы и минимальным уклоном, на котором она может существовать без распада и остановки, при глубинах потоков, представляющих практический интерес.

Например, уклону  $i_4$  соответствуют точки  $a$ ,  $b$  и  $c$ , в которых энергия, необходимая для поддержания всех частиц во взвешенном состоянии, равна энергии потока, которую он может затрачивать на поддержание этих частиц в упомянутом состоянии. Пусть, в силу каких либо обстоятельств, на уклоне  $i_4$  оказался сел с плотностью  $\rho_1$  (точка  $a'_1$ ). Но сел с плотностью  $\rho_1$ , как это следует из рис. 4, может существовать без остановки и распада на уклоне  $i_2$ . Так как  $i_2 < i_4$ , избыточная энергия потока будет затрачена на увеличение плотности селевой массы до значения  $\rho_2$ . Подобный процесс будет происходить для всех значений плотности, больших нуля в интервале уклонов от нуля до  $i_7$ , если плотность меньше значений, определяемых ветвью  $OA$ .

Пусть на уклоне  $i_4$  оказался сел с плотностью  $\rho_3$  (точка  $a''_2$ ); но поддержание плотности  $\rho_3$  требует энергетических затрат, существующих на уклоне  $i_5$ . Поскольку  $i_5 > i_4$ , из-за недостатка энергии потока на

уклоне  $i_4$  произойдёт частичный распад селевой массы до значения плотности  $\rho_2$ . Подобный процесс будет происходить для всех значений плотности, (в интервале уклонов от нуля до  $i_7$ ), если значения плотности больше значений ветви  $OA$ , но меньше значений ветви  $AB$ .

Обратная ситуация будет наблюдаться, если значения плотности селевых масс будут превышать значения (при соответствующих значениях уклонов), определяемые ветвью  $AB$ , но будут меньше значений, определяемых ветвью  $BC$ .

Превышение плотности, определяемой ветвью  $BC$ , будет приводить к частичному распаду либо остановке селей.

Если в интервале уклонов  $Oi_1$  плотность селевой массы окажется меньше  $\rho_8$ , плотность селевой массы уменьшится до значения, определяемого отрезком  $OA$ .

Наличие отрицательного наклона у кривой, характеризующей зависимость плотности (концентрации твёрдой фазы) селевой массы от минимального уклона, на котором она может существовать без распада и остановки (при глубинах потоков, представляющих практический интерес), может приводить к тому, что с ростом плотности селевой массы поток обретает способность увеличивать свои характеристики при уменьшении (до определённого предела) уклона пути его движения. Это обусловило существование неизвестного ранее явления скачкообразного изменения предельно возможного значения плотности селевой массы при превышении уклоном пути движения селя критического значения.

Если анализировать функцию, характеризующую зависимость максимально возможной плотности селевой массы от уклона пути движения селя, то скачкообразное изменение плотности означает, что при превышении уклоном русла критического значения бесконечно малое увеличение уклона приводит к конечному изменению плотности селевой массы (функция претерпевает разрыв). Критическим значением уклона на рис. 4 является  $i_7$ . Бесконечно малое увеличение (относительно  $i_7$ ) уклона приведёт к возрастанию предельно возможного значения плотности до значения  $\rho_9$ .

Скачкообразное изменение плотности не означает, что плотность селевой массы изменится мгновенно, для этого потребовалась бы бесконечно большая энергия и конечные (по величине) запасы селеформирующих пород на бесконечно малом (по размерам) участке пути движения селя.

Обнаружение явления скачкообразного изменения плотности селевой массы (при превышении уклоном критического значения) затруднялось отсутствием математически строгой теории селеформирования, базирующейся только на фундаментальных физических законах. В этой теории теория турбулентности являлась бы лишь составной частью (о сложности создания теории турбулентности высказался один из выдающихся физиков 20 века, который, скорее всего Р. Фейнман, сказал, что если хочешь всю жизнь заниматься интересным делом и ничего не сделать – займись турбулентностью).

Отсутствие фундаментальной теории селеобразования практически исключало возможность и экспериментального обнаружения явления скачкообразного изменения плотности селевой массы из-за отсутствия критериев подобия, т.к. потребовало бы создания грандиозного сооружения, которое позволяло проводить эксперименты в натуральном масштабе (глубина потока – метры, ширина потока – десятки метров, длина – сотни метров, диапазон изменения наклона лотка – несколько градусов, расход потока – сотни кубометров в секунду, объём селевой массы, образуемой в смесителе – десятки тысяч кубометров), Если бы такая установка всё же была создана (при этом осуществлялось автоматическое поддержание глубины потока за счёт изменения ширины потока), то суть экспериментов свелась к следующему:

1. Для заданного минералогического и гранулометрического составов твёрдой составляющих селевой массы и глубины потока, по методике, изложенной выше, определялись плотность селевой массы  $\rho_4$  и уклон  $i_4$ , соответствующие точке  $A$ .
2. В смесителе формировалась селевая масса с плотностью  $\rho_4$  и производительностью, обеспечивающей поддержание заданной глубины потока на протяжении нескольких сот секунд.
3. Селевая масса подавалась в лоток (дно которого выстилалось рыхлообломочными породами, имеющими состав, идентичный составу твёрдой составляющей селевой массы), а уклон превышал  $i_4$  на бесконечно малую величину.
4. Увеличение плотности селевой массы на конечную величину по мере удаления створа взятия пробы от подачи исходной селевой массы в лоток свидетельствовало бы о скачкообразном изменении плотности селевой массы.

Зависимость предельно возможной плотности селевой массы от уклона русла (соответствующая зависимости между плотностью и минимально возможным углом, на котором не происходит частичный распад селевой массы или её остановка, приведённой на рис. 4), изображена на рис. 5.

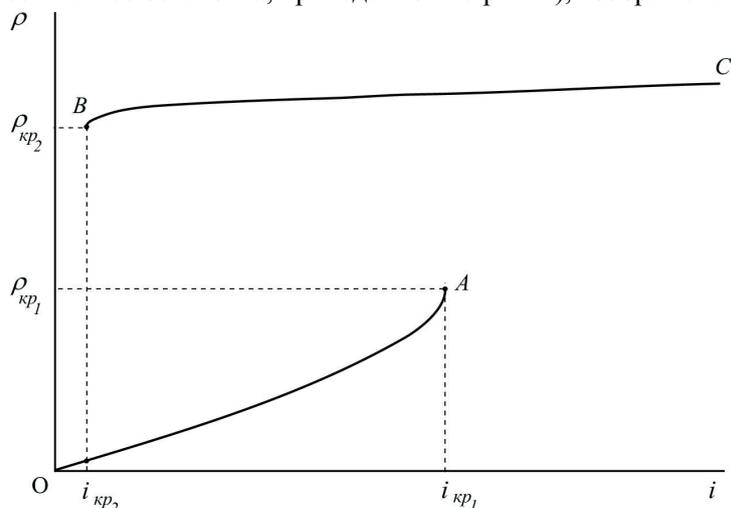


Рис. 5. Зависимость предельно возможной плотности селевой массы) от уклона русла.

Результаты экспериментов, осуществлённых в менее строгой постановке, приведены в [9]. Расчёты, выполненные с использованием приведённых выше математических моделей, описывающих зависимость между плотностью (концентрацией твёрдой фазы) селевой массы и минимальным уклоном, на котором она может существовать без распада и остановки (при глубинах потоков, представляющих практический интерес), для условий, при которых размеры частиц твёрдой фазы селевой массы изменяются от долей микрона до нескольких метров (бассейны рек Иле Алатау), и условий, при которых частицы близки по размерам (пустыня Жаманкум), свидетельствуют о хорошей сходимости явлений, наблюдаемых в природе и вытекающих из теоретических построений.

### Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлена неоднозначная зависимость плотности селевой массы от уклона русла, на котором не происходит её частичный распад или остановка при глубине потока, представляющей практический интерес. Координаты точек перегиба функции, описывающей эту зависимость, определяются глубиной потока, гранулометрическим и минералогическим составом твёрдой составляющей селевой массы.

Выявление наличия отрицательного наклона у функции, описывающей зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном русла, на котором не происходит её частичный распад или остановка, позволило теоретически обосновать существование неизвестного ранее природного явления: скачкообразного увеличения плотности селевой массы при превышении уклоном критического значения (скачкообразного уменьшения плотности, если уклон станет меньше критического значения). Установлено, что величина критического значения уклона русла зависит от плотности селевой массы (при неизменной глубине потока и постоянном гранулометрическом и минералогическом составе твёрдой составляющей селевой массы).

Открытие явления скачкообразного изменения плотности селевой массы имеет большое практическое значение, так как математические модели, разработанные для выявления его природы, могут быть использованы для оценки селевых процессов, обусловленных изменением условий их протекания: формы и уклона русла, изменения плотности и расхода селевой массы в результате слияния селя с водным потоком, изменения гранулометрического и минералогического состава селеформирующих пород степени их увлажнения и т.д. Эти факторы, влияя на ход селевых процессов, определяют в пространстве и времени объём и расход селя, скорость его движения, плотность селевой массы, а, следовательно, и степень угрозы, создаваемой селом.

Характеристики селей и селевой массы, как и характеристики пути их движения изменяются как во времени, так и пространстве. Главными факторами, ответственными за эти изменения, являются морфометрические характеристики пути движения селя, его расход, гранулометрический и минералогический составы твёрдой составляющей. Индикатором состояния селевой массы является плотность. Таким образом, теория существования селевой массы является ключевым элементом математического моделирования селевых процессов, позволяющим характеризовать селевой процесс от момента его зарождения до деградации, выражающейся в распаде селевой массы или её остановке на относительно малых уклонах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.Б. Искусственное воспроизведение селевых потоков на экспериментальном полигоне в бассейне р. Чемолган // Селевые потоки. – 1976. – № 1. – С. 3-7.

2. Виноградов Ю.Б. К методике расчета характеристик селевых потоков // Тр. ГГИ. – 1985. – Вып. 304. – С. 83-89.
3. Виноградов Ю.Б., Земс А.Э., Хонин Р.В. Селевой поток 15 июля 1973 г. на Малой Алматинке // Селевые потоки. – 1976. – № 1. – С. 60-73.
4. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 386 с.
5. Громов В.А., Кайнер В.Д. Опыт определения максимального селевого выброса в бассейне р. Куллумколсу (КБ АССР) // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 209-215.
6. Кайнер В.Д., Громов В.А. Инженерно-геологические особенности селеформирования в бассейне р. Куллумколсу (КБ АССР) // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 202-209.
7. Материалы IV Всесоюзной конференции по селевым потокам / Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959 – 231 с.
8. Степанов Б.С. К природе грязекаменных селей // Гидрометеорология и экология. – 2013. – №2. – С. 40-60.
9. Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 380 с.
10. Тевзадзе В.И., Гордезиане Д.Г., Кешелава И.К. Применение численного метода при расчете неустановившегося движения связного селевого потока по водотокам // Метеорология и гидрология. – 1982. – № 5. – С. 91-97.
11. Takahashi T. (1991): Debris Flow, JAHN Monograph Series, Balkema Publishers, The Netherlands. – 165 p.

Поступила 17.09.2013

Геогр. ғылымд. докторы Б.С. Степанов

**ТҰЗ САЛМАҒЫ ТЫҒЫЗДЫҒЫНЫҢ СЕРКІРМЕЛІ ТҮРДЕ ӨЗГЕРУ ҚҰБЫЛЫСЫ. ОНЫ АШУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТӘЖІРИБЕЛІК МАҢЫЗДЫЛЫҒЫ**

*Сел сипаттамаларының тасымалдану мінездемесі олардың генезисі мен қалыптасу механизміне тәуелсіз. Тұз салмағы тығыздығының серкірмелі түрде өзгеру құбылысын ашу, сел сипаттамаларын есептеудің ғылыми негізделген әдісін жақсартуға мүмкіндік берді. Селдің тасымалдану мінездемесі оның қозғалу жолының ағыны мен морфометриясы, сел салмағының реологиялық сипаттамаларымен анықталады.*