

3. Гидротехнические сооружения (Справочник проектировщика). Под общ. ред. В.П.Недриги. - М.: Стройиздат, 1983.
 4. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П.Г.Киселева. - М.: Энергия, 1975.
 5. Рекомендации по гидравлическому расчету водосливов. Ч. I. - 1974. Ч. 2. - Л.: ВНИИГ, 1976.
-

УДК 624.131.552.6

Ю.А.Соболевский,
Упендра Махато (БГПА)

ГИДРОДИНАМИКА СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ

Водокаменные и грязекаменные селевые потоки возникают в горных местностях.

Известно большое количество катастроф, связанных с подвижкой селей [1-3]. Так, например, в ночь с 17 на 18 августа 1891 г. в Тироле селевой поток с волной 18 м вырвался из ущелья Австрийских Альп и покрыл большую территорию слоем грязекаменного материала. Неоднократно сели набрасывались на один из крупнейших городов Тихоокеанского побережья США - Лос-Анджелес. Сель 1938 г. принес с гор грязекаменную массу более 11 млн.м куб. при среднем расходе 2000 м куб./с и нанес громадные убытки, погибло более 300 человек. 8 июля 1921 г. тяжелая катастрофа произошла в Алма-Ате. Потокom были унесены 182 дома вместе с жителями, погибло около 400 человек. На площадь города была вынесена масса каменного материала около 1,5 млн.т. Выше Алма-Аты на реке Малая Алмаатинка 15 июля 1973 г. в результате прорыва моренных озер в верховьях озер образовался сель, который за два часа заполнил емкость перед плотиной Медео и принес 4 млн.м куб. селевых отложений. Максимальный расход селевого потока достигал 2-3 тыс.м куб/с. Вечером 18 июля по руслу Малой Алмаатинки прошли еще две селевые волны, которые также были задержаны селезащитной земляной плоти-

ной высотой 115 м, возведенной ранее в урочище Медео. Тем самым была надежно защищена Алма-Ата.

В Перу при селевой катастрофе 1970 г. погибло более 50 тыс. человек и 800 тыс. осталось без крова. Подобные примеры можно множить и множить. В мировой практике сложилось определенное направление борьбы с этим грозным явлением. В настоящей статье затронем лишь некоторые основополагающие моменты.

1. Формирование селевых потоков. Сель, подобно паводку, образуется благодаря интенсивному стоку поверхностных (дождевых и талых) вод, которые размывают, смывают, подхватывают и переносят рыхлый материал, накапливающийся в водосборном бассейне горной реки, временного водотока, оврага и т.п. Механизм зарождения селевого потока вдоль ложины иллюстрируется рис.1. Прежде всего ливень вызывает оползень в верхней части склона. Обрушившиеся камни, нанося удары, являются как бы спусковым крючком к началу селя водонасыщенного коллювия или оползневой делювия вдоль некоторого ложа. Тогда оба потока, подобно вязкой жидкости, со скоростью 1-10 м/с движутся по ложбине стока или долине реки, вызывая эрозию отложений. Окончательно селевые потоки, разливаясь веером, застывают сравнительно тонким слоем осажденных частиц различного гранулометрического состава, от крупных глыб до пыли и глины. Ориентировочно можно определить размер крупных включений, транспортируемых селом и выпадающих в осадок при седиментации по следующей приближенной зависимости: $d = 0,2 V^2$, где V - средняя скорость селевого потока, м/с. Так, при $V = 3$ м/с громадные валуны и глыбы размером 1,8 м будут волочиться и выпадать в осадок на большом расстоянии от первоначального их местоположения. Известны случаи, когда селевым потоком перемещались глыбы объемом до 1500 м куб. [2].

Объем и мощность потоков, их режим определяются количеством дождевых и талых вод, поступающих в водосборный бассейн, скоростью и одновременностью добегаания до главного водотока, где формируется селя.

При симметричной форме бассейна поверхностные воды прибегают к транзитному створу одновременно, создают высокий подъем уровня и резкое увеличение расходов. При несимметричном бассейне паводок будет нарастать постепенно и по величине при прочих равных условиях будет меньше.

Разрушительная энергия селей, обусловленная перемещением ог-

речных водокаменных и грязекаменных масс с большими скоростями, пропорциональна превышению водосборного бассейна над базисом эрозии, площади водосборного бассейна и величине уклонов его рельефа. Геоморфологические условия селеопасных русел можно разделить на три части: а) верхнюю, в виде полуцирка с крутыми (от 30 до 40°) склонами, покрытыми осипями, обвалами, оползневыми участками с глубокими промоинами и оврагами; б) среднюю (транзитную) с уклонами до 25-30°; в) нижнюю (приустьевую), где происходит накопление вынесенного пролювиального материала (рис.1).

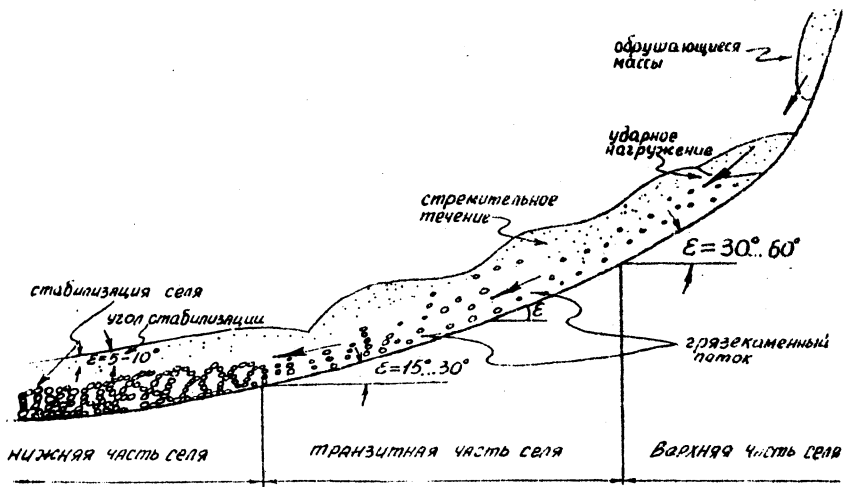


Рис.1. Схема развития и протекания селя

Селевые потоки обычно застывают при уклонах от 5 до 10°. Известны места, где средняя транзитная часть имеет небольшое протяжение или полностью отсутствует. Тогда селевой поток формируется по всей длине.

Как показывают многочисленные наблюдения [1,2], наступлению селей предшествуют длительные обложные дожди, которые пропитывают влагой отложения по пути следования будущего водокаменного, грязекаменного или грязевого потока. Тогда рыхлые отложения в значительной мере теряют связность. Последующие ливни большой интенсивности вызывают на высоких отметках обвалы и оползни, которые и служат, как это показано выше, началом селевого потока. Развитию

грязевых потоков перед обложными дождями и последующими ливнями способствуют длительные засухи, приводящие глинистые отложения к усадкам с глубокими трещинами.

В формировании селевых потоков участвует множество факторов. Часть из них подготавливают рыхлые отложения к разжижению, а часть - являются непосредственной причиной зарождения, развития и протекания селевых потоков. К последним относятся фильтрационные и гидродинамические факторы. Так, при насыщении рыхлых, выветрелых пород во время обложных дождей покровные отложения на горных склонах превращаются в неустойчивую грунтовою массу, пропитанную водой. Из-за уклонов местности в этих отложениях формируется фильтрационный поток с градиентами, близкими к уклонам подстилающего скального ложа.

Перед началом прохождения селя по ложу срединной транзитной части долины действует фильтрационный поток, параллельный поверхности склона по всей толще слоя грунта. Этот поток меняет свое направление, как только по ложу двинется селя. Направление линий тока, и, следовательно, фильтрационных сил становятся нормальными к поверхности склона: возникает восходящий фильтрационный поток для затопленного откоса. Отсюда рассуждения по поводу предельного состояния грунта для параллельного склону фильтрационного потока следует вести из условия сдвига; при наличии восходящего фильтрационного потока - из условия сдвига и фильтрационного отрыва связного грунта. Теория же руслового потока рассматривает стадии размывающих скоростей, грядособразования и начала взвешивания грунта. Нам, очевидно, более всего должны интересовать стадия размыва ложа и стадия взвешивания грунта, когда идет интенсивный захват материала по ходу движения селевого потока. Для стадии размыва влекущая сила $T \approx \gamma_{сел} H_{сел} l$ (где $\gamma_{сел}$ - удельный вес селевого потока, l - уклон русла) как для широких русл.

Для стадии взвешивания равнодействующая лобового и подъемных усилий для частиц грунта

$$F = \alpha_0 A \gamma_{сел} \frac{V^2}{g}$$

где α_0 - коэффициент подъемной силы, принимаемый от 2 до 6;

A - поперечная площадь переносимых частиц;

V - скорость движения селя;

g - ускорение силы тяжести.

Удельная энергия селевого потока зависит от его мощности и скорости движения. Имея в виду значительные скорости движения тяжелой жидкости, правомочно усмотреть фактор захвата грунта в процессе развития селевого потока. Тогда в подучечные районы выражения для критических уклонов и градиентов фильтрующих бесконечных откосов следует ввести скоростной напор с противоположным знаком как символ захвата и таким образом приблизительно оценить этот фактор.

2. Анализ устойчивости на основе обобщенной задачи Ренкина бесконечно прямолинейного откоса при воздействии селевого потока. Грунты наклонного ложа вовлекаются в селевой поток после того, как они будут насыщены водой, а достаточно протяженный откос перед началом ливневого паводка насытится водой и будет фильтровать. Такие фильтрующие откосы можно рассматривать как бесконечные, а напряженное состояние слагающего его грунта следует относить к плоской задаче теории предельного состояния.

При оценке нарушений устойчивости откосов (при действии фильтрационного и селевого потоков) следует различать два условия:

- 1) условие сдвига;
- 2) условие фильтрационного взвешивания для несвязных грунтов и фильтрационного отрыва для связных.

Условие сдвига увязывается с обычными принятыми в теории предельного состояния представлениями о характере линий скольжения в грунтовом массиве. Условия фильтрационного взвешивания для несвязных грунтов и фильтрационного отрыва для связных характеризуются градиентами напора восходящих к плоскости откоса фильтрационных потоков.

Критериями этих двух условий являются соотношения удельного веса взвешенного в воде грунта к удельному весу воды для подкаменного потока и удельному весу шлеватато-глинистой суспензии для грязекаменного потока.

Для анализа гидродинамики зарождения грязекаменных потоков будем развивать задачу Ренкина. Так как эта задача вошла в круг классических решений статики сплошной среды, основы теории которой были разработаны и обобщены В.В.Соколовским [4], то в нашем изложении используем терминологию и символику, ставшую традиционной для этой теории.

Рассматриваем предельное напряженное состояние приповерхностного слоя откоса под действием селевого потока для двух

случаев: а) бесконечного водонасыщенного откоса при наличии в нем фильтрации параллельно склону (рис.2 а); б) бесконечного водонасыщенного загропленного движущимся селем откоса при наличии фильтрации нормально к поверхности слоя (рис.2 б).

Предшествующие выкладки к такому рассмотрению изложены в монографии Ю.А.Соболёвского [5].

а) Можно предположить, что при выходе селевого потока на его транзитный участок будет иметь место в поверхностном слое ложа фильтрация вдоль склона. Тогда действие скоростного потока может вызвать предельное состояние в откосном слое конечной толщины под селем.

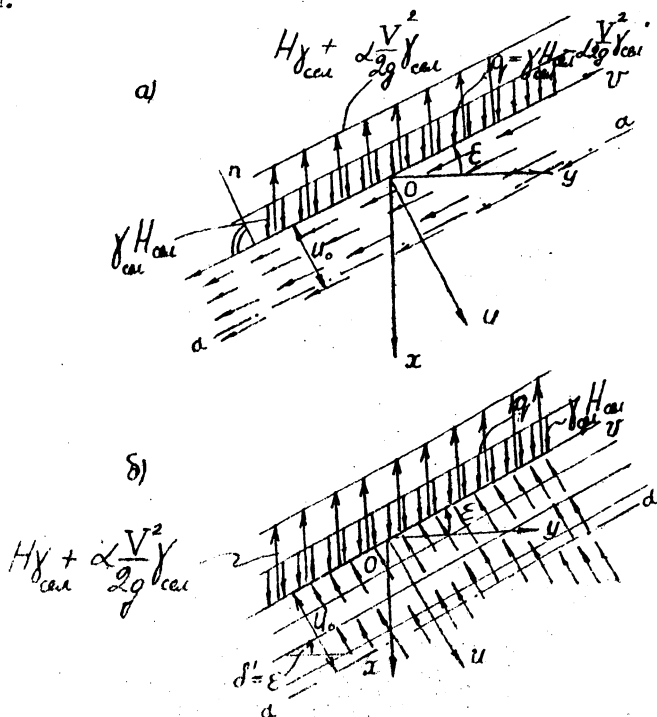


рис.2. Расчетная схема эжекции селевым потоком грунта откоса: а — фильтрационный поток движется параллельно поверхности откоса ($\beta = 90^\circ$); б — фильтрационный поток выходит нормально к поверхности откоса ($\beta = 0^\circ$)

Для этой цели используем равенство связи критического угла наклона бесконечного фильтрующего откоса, слоя предельно напряженного грунта и пригрузки на нем [5]:

$$(\gamma_{sz} u_0 + q) \sin \epsilon_{кр} = (\gamma_{sb} u_0 + q) \operatorname{tg} \rho \cos \epsilon_{кр} + k, \quad (1)$$

- где γ_{sz} - удельный вес насыщенного водой грунта;
 γ_{sb} - удельный вес взвешенного в воде грунта;
 ρ - угол внутреннего трения грунта;
 k - удельное сцепление грунта;
 $\epsilon_{кр}$ - критический угол наклона откоса в предельном напряженном состоянии;
 u_0 - толщина приповерхностного откосного слоя грунта в предельно напряженном состоянии;
 q - пригрузка откоса.

В качестве пригрузки используем статическое и динамическое воздействие селевого потока [6,7]:

$$q = q_{ст} + q_{дин} = H_{сел} \gamma_{сел} - \left(H_{сел} + d \frac{V^2}{2g} \right) \gamma_{сел},$$

здесь α - коэффициент динамичности селя (в первом приближении принимаем его равным единице).

Тогда

$$\left(\gamma_{sz} u_0 - \alpha \frac{V^2}{2g} \gamma_{сел} \right) \sin \epsilon = \left(\gamma_{sb} u_0 - \alpha \frac{V^2}{2g} \gamma_{сел} \right) \operatorname{tg} \rho \cos \epsilon + k. \quad (2)$$

Откуда критическая смещающая грунт в пределах толщины слоя скорость селя определится как

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{2g \left[\frac{\gamma_{sz} u_0 \operatorname{tg} \rho}{\alpha \gamma_{сел} \operatorname{tg} \rho - \operatorname{tg} \epsilon} - \frac{\gamma_{sz} \operatorname{tg} \epsilon}{\gamma_{сел} \operatorname{tg} \rho - \operatorname{tg} \epsilon} + \frac{k}{\gamma_{сел} (\operatorname{tg} \rho \cos \epsilon - \sin \epsilon)} \right]}{1}}; \quad (3)$$

при $k = 0$

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{2g \left[\frac{\gamma_{sz} \operatorname{tg} \rho}{\alpha \gamma_{сел} \operatorname{tg} \rho - \operatorname{tg} \epsilon} - \frac{\gamma_{sz} \operatorname{tg} \epsilon}{\gamma_{сел} \operatorname{tg} \rho - \operatorname{tg} \epsilon} \right]}{1}} \quad (3)$$

Глубина предельно напряженного слоя грунта под действием селевого потока

$$u_0 = \frac{\alpha \frac{V^2}{2g} (\operatorname{tg} \rho \cos \varepsilon - \sin \varepsilon) \gamma_{\text{сел}} + k}{\gamma_{\text{сб}} \operatorname{tg} \rho \cos \varepsilon - \gamma_{\text{сз}} \sin \varepsilon}$$

при $k = 0$

$$u_0 = \frac{\alpha \frac{V^2}{2g} (\operatorname{tg} \rho - \operatorname{tg} \varepsilon) \gamma_{\text{сел}}}{\gamma_{\text{сб}} \operatorname{tg} \rho - \gamma_{\text{сз}} \operatorname{tg} \varepsilon}$$

Таким образом, при выходе селевого потока на транзитный участок в его ложе формируются условия предельного состояния грунта в ограниченном слое. Эти условия облегчают захват грунта этого слоя с вовлечением его в селевой поток.

б) Однако водонасыщенный грунт ложа, поверхность которого покрывается движущимся селем, ответит поворотом фильтрационного потока нормально к поверхности склона. При этом правомерно для оценки последующего сдвижного эффекта в толще грунта u_0 использовать соответствующую зависимость, где вводится δ' — угол наклона линий равного давления к поверхности склона. Тогда

$$\begin{aligned} \sin \varepsilon_{\text{кр}} \left[\left(\gamma_{\text{сб}} u_0 - \alpha \frac{V^2}{2g} \gamma_{\text{сел}} \right) \operatorname{tg} \delta' \operatorname{ctg} \rho + \gamma_{\text{в}} u_0 \right] = \\ = \left(\gamma_{\text{сз}} u_0 - \alpha \frac{V^2}{2g} \gamma_{\text{сел}} \right) \operatorname{tg} \delta' \cos \varepsilon_{\text{кр}} + C_k \operatorname{tg} \delta' \end{aligned} \quad (5)$$

Из этого уравнения можно найти сдвижную критическую скорость селевого потока для полосы грунта толщиной u_0 . Из-за изменчивости величины $\operatorname{grad} k$ решение приближенно будет справедливо лишь на ограниченных участках, где угол δ' наклона равного давления к контуру откоса будет отличаться незначительно.

Энергия селевого потока не ограничивается сдвижным эффектом и переводом слоя грунта в предельно напряженное состояние. Интенсивность воздействия такова, что при движении вниз по водонасыщенному транзитному участку возникнет фильтрационный отрыв части грунта с его захватом и разжижением. Селевой поток наполнится новой массой грунта и его разрушительная сила возрастет.

Далее фильтрационный отрыв грунта при движении селевого

потока прослеживается путем анализа выражения, приведенного в монографии [5]:

$$i_{кр} = \frac{\gamma_{sb}}{\gamma_w} \cos \varepsilon + \frac{\rho}{\gamma_w u_0} + \frac{2k}{\gamma_w u_0}, \quad (6)$$

где

$$i_{кр} = \frac{\sin(\varepsilon - \delta')}{\sin \delta'} \quad \text{и} \quad \rho = \left[H_{ces} \gamma_{ces} - \left(H_{ces} \gamma_{ces} + d \frac{V^2}{2g} \gamma \right) \right] \cos \varepsilon.$$

Тогда

$$\gamma_w u_0 \frac{\sin(\varepsilon - \delta')}{\sin \delta'} = \gamma_{sb} \cos \varepsilon - d \frac{V^2}{2g} \cos \varepsilon + 2k. \quad (7)$$

Здесь следует учитывать изменчивость значений гидравлических градиентов на выходе фильтрационного потока на склон, по которому движется селевой поток.

Анализ фильтрационной устойчивости склона транзитного участка необходимо начинать с построения изобар, т.е. линий равного порового давления. Следует иметь в виду, что при постоянстве направлений линий тока нормально к поверхности прямолинейного откоса величина гидравлического градиента будет возрастать из-за изменчивости направления линий равного давления. Так, угол наклона δ' линии равного давления к прямолинейному контуру откоса при восходящем фильтрационном потоке будет изменяться от $\delta' = \varepsilon$ до $\delta' = 0$, соответственно изменяется и градиент ($i = \text{grad} K$) от 0 до ∞ .

Ввиду того, что в выражении (7) отсутствует линейный размер вдоль склона, определение толщи фильтрационно оторванного (или разжиженного) грунта и скорости, при которой эти явления происходят, следует производить методом фрагментов. На рис. 3 показана эпюра выходных градиентов. Задаваясь скоростью движения сели V , возможной толщиной фильтрационно-взвешенного грунта при соответствующих параметрах селевого потока и грунта, можно определить гидравлические градиенты и линии равного порового давления с наклоном

$$\text{grad } H = \frac{\sin(\varepsilon - \delta')}{\sin \delta'}$$

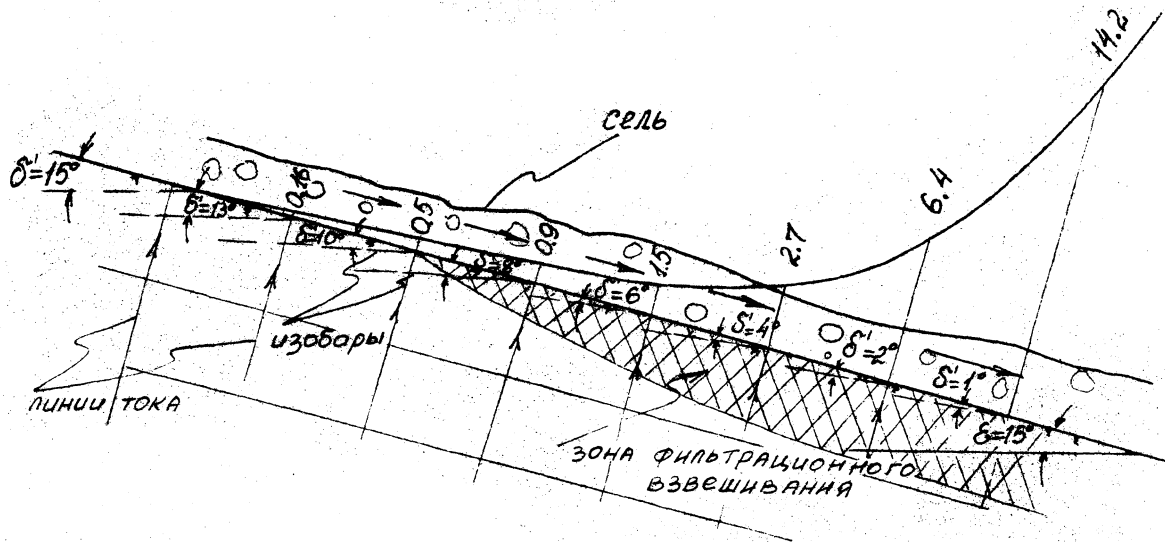


Рис.3. Эпюра выходных градиентов водонасыщенного склона под селевым потоком

к контуру откоса и тем самым очертить по длине транзитного участка область захвата грунта селевым потоком.

3. Условия стабилизации водо- и грязекаменных потоков. Грязевая суспензия движется со скоростью 1-10 м/с. В финале поток растекается веером по плоской поверхности грунта. Стабилизируясь, сели образуют пологие склоны или задерживаются во временных запрудах с валами 5 и даже 10-15 м высотой. Скорость движения потока зависит от плотности суспензии, в которой перемещается каменный материал. Плотность колеблется от 1 до 1,40 т/см куб., т.е. представлена либо водой с незначительными примесями пылеватых частиц, либо пылевато-глинистой суспензией. Плотность селя может составлять 1,75 т/см куб. и более в зависимости от насыщения каменным материалом. Средняя вязкость селя при размерах камней 1,5-1,8 м в поперечнике может достигать 3 м/с. В качестве угла внутреннего трения в селевом потоке рекомендуется принимать их кинематический угол внутреннего трения, который приблизительно может быть принят равным 25° [5].

Используя зависимость для критического наклона участка высачивания, найдем пределы угла стабилизации селевых потоков при плотностях суспензий от 1 до 1,4 т/м куб. и плотности селя в целом, равной 1,75 т/м куб.

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\gamma_{\text{сб}}}{\gamma_{\text{селя}}} \operatorname{tg} \rho ;$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{17,5-10}{17,5} \operatorname{tg} 25^{\circ} = 0,20; \quad \varepsilon = 11^{\circ}19' ;$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{17,5-14,0}{17,5} \cdot \operatorname{tg} 25^{\circ} = 0,09; \quad \varepsilon = 5^{\circ}08' ;$$

Угол стабилизации будет находиться в пределах от 11° (для водной взвешенной среды) до 5° (для пылевато-глинистой суспензии), что собственно и наблюдается в областях распространения селевых потоков.

Теперь представим, что нам удалось насытить селя воздухом с помощью перфорированных труб, проложенных по пути следования потока, доведя вмещающую суспензию до удельного веса 7,5 т/м куб.

Тогда

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{17,5 - 7,5}{17,5} \operatorname{tg} 25^\circ = 0,27; \quad \varepsilon = 15^\circ.$$

Из вышеприведенного текста вытекает, что на транзитном участке развития и движения селя создаются фильтрационные условия для захвата больших масс грунта и пополнения ими грязекаменного потока. Очевидно, как это следует из рис.3, что для того, чтобы избежать явления фильтрационного взвешивания грунта ложа при прохождении по нему селя, селеопасные участки необходимо глубоко дренировать. Тогда осуществляется эффективное погашение порового давления, возникающего из-за скоростного напора, резко уменьшается захватный эффект селя, пресекается наращивание его энергии на транзитном участке.

Литература

1. Ломтадзе В.Д. Инженерная геодинамика. - Л.: Недра (Ленингр. отд.), 1977.
2. Маслов П.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. - М.: Высшая школа, 1982.
3. Decja B., Dhital M., Thapa B., Wagner A. Mountain Risk Engineering. Handbook - Part 1. Subject Background. ICIMOD. - Kathmandu, Nepal, 1991.
4. Соболевский В.В. Статика сыпучей среды. - М.: Гостехиздат, 1954.
5. Соболевский Ю.А. Водонасыщенные откосы и основания. - Минск: Высшая школа, 1975.
6. Михневич Э.И. Устойчивость русел открытых водотоков. - Минск: Ураджай, 1988.
7. Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс. - М. Л.: Госэнергоиздат, 1962.