

5. Степанов И.Н. Истинные и ложные линии на почвенных картах // Почвоведение. 1990. № 3. С. 128–146.

6. Шарый П.А. Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2006. Т. 8. №2. С. 458–473.

7. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа : диссертация ... доктора технических наук : 25.00.33. Пушино, 2010.

8. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology // Hydrol. Sci. Bull. 1979. Vol. 24. № 1. P. 43–69.

9. Evans I.S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping // Z. Geomorphol. Suppl. 1980. № 36. P. 274–295.

10. Guth P.L. Terrain Organization Calculated From Digital Elevation Models // Concepts and Modelling in Geomorphology : International Perspectives. Tokyo, 2003. Pp. 199–220. Mode of access : <http://www.terrapub.co.jp/e-library/>. Date of access :

## **СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И УГЛА АТАКИ НА СКОРОСТЬ РАЗМЫВА ПОЧВЫ<sup>2</sup>**

**Г.А. Ларионов, А.В. Горобец, С. Ф. Краснов, Л.Ф. Литвин**

*Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

В фундаментальной монографии Н. И. Маккавеева [6] одной из актуальнейших и в то же время недостаточно освещенных проблем гидрологии называется оценка факторов и механизмов размыва связных и несвязных грунтов. В частности, отмечается необходимость исследования пригружающего эффекта гидравлического давления на начальную скорость отрыва частиц. Так, И.Ф. Бурлай [1] выдвинул идею о неправомерности гипотезы взвешивания применительно к частицам грунта, которые соприкасаются с нижележащими частицами. Он полагал, что даже при точечном контакте вследствие больших удельных напряжений происходит смятие частиц по контакту, «благодаря чему точечный контакт обращается в контакт по площадке», в пределах которой гидравлическое давление не передается. Конечно, трудно представить, что кварцевые зерна, которые использовал в экспериментах И.Ф. Бурлай [1], могут деформироваться в точках контакта, однако, глинистые частицы и почвенные агрегаты гораздо пластичнее.

---

<sup>2</sup> Выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева (разработка методики и аппаратуры) и при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00474, выполнение опытов и анализ результатов).

Для объяснения эффекта давления применительно к почвам и агрегированным грунтам может быть предложена другая гипотеза механизма возникновения пригружающего эффекта гидравлического давления на частицы почвы или грунта. Значительную часть почв и грунтов составляют слоистые глинистые минералы. Частицы глинистых минералов несут электрический заряд, который компенсируется противоионами, располагающимися на внешних и внутренних гранях кристаллитов. На минеральной поверхности глинистых частиц образуется слой адсорбированной воды толщиной до 10 нм, который обладает специфическими структурными свойствами [8]. За адсорбционным слоем противоионов следует диффузный слой, который имеет намного большую толщину по сравнению с адсорбционным и распределяется от поверхности частиц на расстояние до 100 нм и более. Осмотически притянутые молекулы воды входят в состав гидратного комплекса противоионов и образуют вокруг частицы второй (после адсорбционного) гидратный слой связанной воды [8]. Именно гидратный слой пленочной влаги обуславливает проявление расклинивающего давления, когда силы молекулярного притяжения ослабевают. Источником пригружающего давления может быть вес вышележащего слоя глинистых частиц, если отсутствует взвешивающая сила воды, которая еще уменьшает силу сцепления. Верхний моноагрегатный слой грунта очень слабо удерживается на поверхности монолита, что, в частности, может быть причиной variability результатов при небольших изменениях в условиях экспериментов.

Для проверки пригружающего эффекта давления в отношении почв и агрегированных грунтов нами были проведены эксперименты на трубчатом герметичном гидравлическом лотке (гидродинамической трубе), позволявшем изменять гидростатическое давление в диапазоне от 0 до 1,5 бар. В качестве исходного материала для исследований во всех видах опытов, приведенных в данном сообщении, использовали пахотный горизонт легкоглинистого выщелоченного чернозема из Воловского района Тульской области [2–5]. Воздушно-сухую почву рассеивали на стандартном наборе сит и из фракции 1–2 мм отбирали навески для формирования образцов. Навески почвы помещали в бюксы и увлажняли до 24 %-ной влажности от массы воздушно-сухой почвы. После 16–18 часовой выдержки образцов их плотность доводили в кассетах до заданной величины ( $1,3 \text{ г/см}^3$ ). Интенсивность размыва вычисляли как частное от деления массы смытой почвы на время размыва и приводили к площади, равной  $1 \text{ м}^2$ . Так как скорость размыва почвы зависит от температуры воды [4], то в продолжение опыта её поддерживали в узком диапазоне ( $19\text{--}23 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

При оценке влияния гидростатического давления на интенсивность размыва почвы были получены следующие результаты (табл. 1).

**Интенсивность размыва чернозема при различном гидростатическом давлении водного потока**

<i>H</i> , Бар	<i>M</i> , г/м <sup>2</sup> ·с	<i>s</i> , г/м <sup>2</sup> ·с	<i>Cv</i> , %	<i>m</i> , г/м <sup>2</sup> ·с	<i>M<sub>n</sub></i> – <i>M<sub>n+1</sub></i> , г/м <sup>2</sup> ·с
0	41,3	5,79	14,0	2,59	-
0,25	20,3	6,73	33,2	3,01	21,0
0,50	10,4	1,09	10,5	0,49	9,89
0,75	2,96	1,94	65,5	0,69	7,45
1,00	1,73	0,72	41,6	0,32	1,23
1,25	1,35	0,33	24,4	0,15	0,38
1,50	1,16	0,54	46,6	0,27	0,19

*Примечание:* *H* – гидростатическое давление водного потока; *M* – средние значения интенсивности размыва почвы; *s* – средние квадратические отклонения значений *M*; *Cv* – коэффициенты вариации значений *M*; *m* – ошибки средних значений *M*; *M<sub>n</sub>*–*M<sub>n+1</sub>* – изменения значений *M* при увеличении значений *H* на 0,25 бар.

Таким образом, в результате лабораторных экспериментов установлено существенное влияние гидростатического давления (глубины потока) на интенсивность размыва почвы и соответствующая эмпирическая формула, достоверно описывающая эту зависимость.

$$M = 41,5 \cdot e^{-2,757 H} \quad (1)$$

Н.И. Маккавеев [7] указывал, что одним из ведущих факторов интенсивности смыва почв, боковой и глубинной эрозии в руслах рек является угол подхода (угол атаки) водной струи к берегу, объясняя это гидромониторным эффектом.

Экспериментальное исследование влияния угла атаки на интенсивность размыва проводили на гидравлическом лотке с изменяющейся геометрией русла. Конструкция лотка позволяла изменять угол подхода оси потока к поверхности размываемого почвенного образца в диапазоне от 0 до 50° с шагом в 10°. Образец нарушенного сложения из пахотного горизонта легкоглинистого чернозёма размещали на боковой стенке колена лотка, обращенного навстречу потоку. В экспериментах скорость течения потока, измеренная у поверхности образца, составляла от 1,18 до 1,28 м/с. Максимальная скорость течения потока наблюдалась при угле атаки в 30°, а при дальнейшем увеличении угла она несколько снижалась вследствие возникновения подпора течения.

Проверка этого явления показала, что вода с наибольшей скоростью размывала почву при угле подхода оси потока около 50° и дальнейшее увеличение угла подхода к борту русла приводило к снижению эрозии благодаря образованию застойной зоны на этом участке [5].

С целью избежания эффекта застойной зоны размыв образцов почвы струей воды проводили на специально сконструированной установке,

пространственное положение насадки в которой изменяли от 2 до 90° с шагом в 15° [2]. Угол атаки устанавливали путем изменения наклона насадки. Плотность почвы и условия подготовки образцов для размыва были аналогичны с экспериментами по оценке влияния гидростатического давления. В процессе обработки экспериментальных данных интенсивность размыва почвенных образцов приводили к средней температуре 27°С по эмпирической зависимости, полученной в предыдущих исследованиях [4]. В расчетах использовали среднюю скорость истечения воды из насадки для всех вариантов опыта равную 1,02 м/с.

Зависимость интенсивности размыва черноземной почвы от угла наклона струи воды приведена на рис. 1. Из графика следует, что наибольший размыв приходится на угол атаки от 30 до 45°. Следует установить, какие факторы влияют на интенсивность смыва почвы при углах атаки более 0°. Из опытов с гидродинамической трубой следует, что гидростатическое давление оказывает большое влияние на изменение скорости размыва почвы.

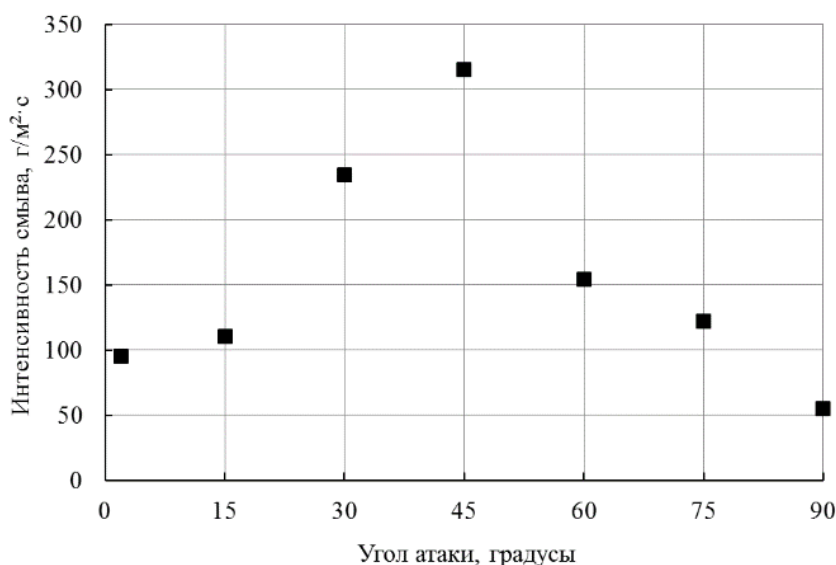


Рис. 1 – Влияние угла атаки на интенсивность размыва почвы

Давление воды на перпендикулярную течению воды поверхность рассчитывается по формуле

$$P = m \cdot v^2 / 2 \quad (2)$$

Полное гидродинамическое давление (при угле атаки в 90°) составляет 0,5 бар, так как средняя скорость потока в данном опыте – 1,02 м/с. Давление на поверхность образца, расположенную под некоторым углом к оси потока, равно произведению квадрата синуса этого угла на выражение полного гидродинамического давления. Поправку на гидродинамическое давление определяли отношением интенсивности смыва, рассчитанной по формуле (1) при давлении  $H$ , к смыву при нулевом давлении.

Кроме давления следует также учесть и изменение горизонтальной составляющей скорости потока в зависимости от угла атаки. Поправка в этом случае численно равнялась кубу косинуса угла атаки.

Следует отметить, что скорость и объем поступления воды, ослабляющей межагрегатные связи, зависит от угла атаки. Оптимальные условия для поступления воды из струи в зернистый грунт складываются при угле атаки от 30 до 60°. В этом случае гидродинамический напор содействует продвижению воды вглубь грунтовой массы. При увеличении угла атаки увеличивается и площадь контакта каждого агрегата с водным потоком.

Совместный анализ результатов экспериментов по оценке роли давления и опытов, определяющих суммарную тенденцию изменения интенсивности смыва при различных углах атаки потока, дает возможность отдельно оценить влияние этих факторов. Интенсивность смыва под влиянием гидродинамического давления и горизонтальной составляющей скорости потока рассчитывали исходя из интенсивности смыва при нулевом угле атаки с учетом вышеназванных поправок. Разность смыва между экспериментальными данными и смыва с учетом поправок (табл. 2, правый столбец) характеризует влияние всех прочих факторов на интенсивность смыва почвы.

Таблица 2

**Влияние гидродинамического давления на интенсивность смыва почв при изменении угла атаки потока**

Угол атаки, градусы	Интенсивность смыва (эксперимент), г/м <sup>2</sup> ·с	Гидродинамическое давление, бары	Поправка на гидродинамическое давление	Поправка на скорость от угла атаки	Интенсивность смыва с учетом поправок, г/м <sup>2</sup> ·с	Интенсивность смыва от прочих факторов, г/м <sup>2</sup> ·с
0	95,2	0,0	1,0	1,0	95,2	0,0
2	95	0,0006	0,998	0,998	94,8	0,2
15	110	0,033	0,913	0,901	78,3	31,7
30	234	0,125	0,708	0,649	43,7	190,3
45	315	0,250	0,502	0,353	16,9	298,1
60	154	0,375	0,356	0,125	4,2	149,8
75	122	0,466	0,277	0,017	0,4	121,6
90	55	0,500	0,252	0,0	0	55

В число этих факторов, на наш взгляд, можно включить проникающее поступление воды в межагрегатное пространство и динамическое воздействие потока. Максимальные значения интенсивности смыва от этих факторов довольно равномерно расположены вокруг 50°, что свидетельствует о большой роли угла подхода струи воды к размываемой поверхности почвы. Роль гидродинамического давления превалирует при мак-

симальных углах атаки, тогда как при его средних значениях главным является эффект проникновения свободной воды в верхние слои почвы – при углах атаки 30–75°, что составляет вклад в общую интенсивность смыва более 80 %. В тоже время следует отметить довольно большую вариабельность результатов экспериментов по оценке влияния самого гидростатического давления. В связи с этим при дальнейшей разработке данного вопроса возможны численные корректировки некоторых зависимостей, что не может существенно повлиять на характер установленных тенденций.

#### **Библиографические ссылки**

1. Бурлай И. Ф. О начальной скорости донного влечения // Метеорология и гидрология. 1946. № 6. С. 51–57.
2. Ларионов Г. А., Бушуева О. Г., Горобец А. В., Добровольская Н. Г., Кирюхина З. П., Краснов С. Ф., Кобыльченко (Куксина) Л. В., Литвин Л. Ф., Судницын И. И. Влияние угла атаки на скорость размыва связного зернистого грунта на примере черноземной почвы // Почвоведение. 2018. № 2. С. 253–256.
3. Ларионов Г. А., Бушуева О. Г., Горобец А. В., Добровольская Н. Г., Кирюхина З. П., Краснов С. Ф., Литвин Л. Ф., Максимова И. А., Судницын И. И. Экспериментальное исследование факторов, влияющих на эродруемость почв // Почвоведение. 2018. № 3. С. 347–356.
4. Ларионов Г. А., Бушуева О. Г., Добровольская Н. Г., Кирюхина З. П., Краснов С. Ф., Литвин Л. Ф. Влияние температуры воды и влажности почвы на эродруемость образцов чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 890–896.
5. Ларионов Г. А., Гендугов В. М., Добровольская Н. Г., Кирюхина З. П., Литвин Л. Ф. Механизмы боковой эрозии в склоновых ручьях // Почвоведение. 2008. № 3. С. 330–337.
6. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. Москва : Изд-во АН СССР, 1955.
7. Маккавеев Н. И. Сток и русловые процессы. Москва : Изд-во МГУ. 1971.
8. Осипов В. И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–34.

## **СОВРЕМЕННЫЕ РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРЕДЕЛАХ ВОДОСБОРНОГО БАСЕЙНА НАРОЧАНСКОЙ ОЗЕРНОЙ ГРУППЫ**

**А.И. Павловский, М.С. Томаш, С.В. Андрушко, В.Л. Моляренко**

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель*

Современную структуру рельефа водосборного бассейна Нарочанской озерной группы можно представить как многоуровневую иерархическую систему, состоящую из совокупности простых образований. Это элементарные водосборные бассейны, в которых потоки вещества и энергии про-