

**МЕЖВУЗОВСКИЙ НАУЧНО-КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ
ПО ПРОБЛЕМЕ ЭРОЗИОННЫХ, РУСЛОВЫХ
И УСТЬЕВЫХ ПРОЦЕССОВ**

**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ КОЗЬМЫ МИНИНА
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ВОДНОГО
ТРАНСПОРТА**

**ЭРОЗИОННЫЕ, РУСЛОВЫЕ И УСТЬЕВЫЕ
ПРОЦЕССЫ (ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛОДЫХ
УЧЕНЫХ УНИВЕРСИТЕТОВ)**

**Сборник статей по материалам XI семинара молодых ученых вузов,
объединяемых советом по проблеме эрозионных,
русловых и устьевых процессов**

**Нижний Новгород
2016**

УДК 551.311.21+556.537+504.4
ББК 26.222.5
Э 81

Редакционная комиссия:

проф. Р.С. Чалов (председатель), к.г.н. С.Р. Чалов (заместитель председателя),
П.П. Головлев (заместитель председателя), А.Л. Варенов (заместитель председа-
теля), к.г.н. В.Р. Беляев, к.г.н. С.Н. Ковалев, д.т.н. И.В. Липатов, д.г.н. Н.Н. Назаров,
к.г.н. С.Н. Рулева (ученый секретарь), д.т.н. А.Н. Ситнов, к.г.н. С.А. Соткина,
д.г.н. А.В. Чернов.

Рецензенты:

*доктор географических наук Л.Ф. Литвин,
доктор географических наук И.И. Рысин*

*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-35-10150*

Печатается по постановлению Президиума Межвузовского научно-
координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых
процессов при МГУ

**Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования
Э 81 молодых ученых университетов):** сборник статей по материалам
XI семинара молодых ученых вузов, объединяемых советом по
проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов.
Н.Новгород: Мининский университет, 2016. 272 с.; илл.
ISBN 978-5-85219-460-2

В сборник вошли статьи, написанные по материалам докладов молодых уче-
ных (студентов старших курсов, магистрантов, аспирантов, научных сотрудников и
преподавателей) на XI семинаре, организованном Межвузовским научно-
координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процес-
сов при МГУ. Семинар состоялся в г.Нижний Новгород на базе Нижегородского
государственного педагогического университета имени Козьмы Минина и Волж-
ского государственного университета водного транспорта.

Рассчитан на гидрологов, геоморфологов, почвоведов, геоэкологов, специа-
листов по эрозии почв, овражной эрозии и русловым процессам, водным путям.

УДК 551.311.21+556.537+504.4
ББК 26.222.5

ISBN 978-5-85219-460-2

© Мининский университет, 2016

ливный цикл, и использование для калибровки модели постоянного коэффициента сопротивления не может дать необходимый результат.

Пути решения проблемы является либо переход к другой одномерной гидродинамической модели, в которой предусмотрена возможность задания калибровочных параметров в виде функции от ряда факторов, либо использование в качестве исследовательского инструмента двумерных и трехмерных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

Грушевский М.С. Некоторые вопросы расчетов неустановившегося движения воды в реках // Труды ГГИ, 1967. Вып.140.

Демиденко Н. А., Зиновьев А. Т., Алабян А. М., Панченко Е. Д., Фингерт Е. А., Льюменс М. Х. Исследование и моделирование параметров гидрологического режима и динамики взвешенных наносов в Мезенском заливе и эстуариях Мезени и Кулоя / Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Том 3, Геология морей и океанов // М: ГЕОС, 2015. С. 175–179.

Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.

Третьяков М.В., Иванов В.В. Состояние и проблемы развития технологий оценки и прогнозирования интрузии морских вод // Труды ГОИН, 2013. Вып. 214.С. 200– 212.

Mike 11. A modeling system for Rivers and Channels. Reference Manual / Mike by DHI. Denmark, 2009. P. 524.

Е.В. Промахова, младший научный сотрудник

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ ВДОЛЬ УЧАСТКОВ РЕК НИЖЕ ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОСТУПЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ¹

(научный руководитель – д.г.н. Н.И. Алексеевский)

Моделирование распределения мутности воды вдоль рек демонстрирует вклад основных процессов, определяющих поведение взвешенных частиц в потоке, исключая влияние локальных факторов. Увеличение мутности вызывают добыча россыпей в долинах рек, работа землеройной техники в руслах (сооружение траншей трубопроводов, русловыправительные работы и т.д.). Для расчёта, прогноза и предотвращения негативного влия-

¹ Выполнено по теме НИР научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ и при частичной поддержке РФФИ (проекты 15-05-03752 и 15-04-03341) и гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых – кандидатов наук (проект МК-5835.2016.5)

ния поступления дополнительной мутности необходимо создание четких, универсальных алгоритмов оценки переноса взвешенных частиц ниже хозяйственных объектов.

Существующие способы расчёта распределения мутности воды в потоке имеют ряд недостатков. Моделирование с помощью крупных программных комплексов (MIKE, DELFT, STREAM, GSTARS, серия HEC, HY и др.) требует большого количества исходных материалов (детальной информации о рельефе, гидрологических характеристиках и т.д.), получение которых зачастую затруднительно. Кроме того, в основе этих моделей лежат эмпирические и полуэмпирические уравнения транспорта наносов [Engelund, Hansen, 1967; Toffaleti, 1968; Yang, 1973 и др.], некоторые рассчитывают сток взвешенных и влекомых наносов в совокупности [Ackers, White, 1973].

К результатам, полученным отечественными исследователями, относится уравнение распределения мутности по длине потока на основе балансового подхода, предложенное А.В. Караушевым [1977]. Основные сложности его применения связаны с заданием транспортирующей способности потока. Процесс перемещения взвешенных частиц в реке также описан А.Д. Гиргидовым [2003]. Для ламинарного потока расстояние L , на которое переносится частица в реке, пропорционально скорости v , глубине потока h и имеет обратную зависимость от гидравлической крупности частиц ω : $L = hv/\omega$. В случае турбулентного режима течения распределение мутности по длине потока в фиксированный момент времени похоже на нормальное распределение Гаусса, а расстояние, на котором находится основная доля частиц зависит от времени. Этот подход вошёл в основу методики ГГИ расчёта распространения мутности в малых водотоках [Добыча..., 2012].

Существует ряд методик, разработанных для разных условий поступления взвешенных частиц в водотоки [Баула, 1994; Рекомендации..., 1981; Graf, Acaroglu, 1968], которые основаны на региональных эмпирических зависимостях мутности от гидравлических характеристик потока, что приводит к их малой универсальности.

Распределение мутности S по длине потока эффективно описывать с помощью уравнения турбулентной диффузии взвешенных частиц [Маккавеев, 1931; Караушев, 1977]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{A}{\rho} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) - \left(v \frac{\partial S}{\partial x} + u \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \omega \frac{\partial S}{\partial y}, \quad (1)$$

где A – коэффициент турбулентного обмена, ρ – плотность воды, t – время; u , v , w – составляющие вектора местной скорости, x , y , z – продольная, вертикальная (возрастает от поверхности воды ко дну) и поперечная пространственные координаты соответственно.

Считается, что для описания продольного распространения мутности в реках необходимо прибегать к упрощению уравнения (1) при условиях, что мутность по глубине и ширине потока не изменяется: $\partial S/\partial z = \partial S/\partial y = 0$. Однако такой подход оказывается несостоятельным, так как при осаждении частиц происходит её изменение по глубине потока (рис. 1). Получение аналитического решения уравнения турбулентной диффузии взвешенных частиц вдоль рек возможно при принятии ряда допущений [Премахова, 2016]:

- глубина, ширина и скорость потока в реке на исследуемом участке неизменны;
- в пределах рассматриваемого участка отсутствуют другие источники поступления взвешенных наносов или ими можно пренебречь;
- режим мутности установившийся ($\partial S/\partial t = 0$);
- поперечная и вертикальная компоненты скорости $w = u = 0$.

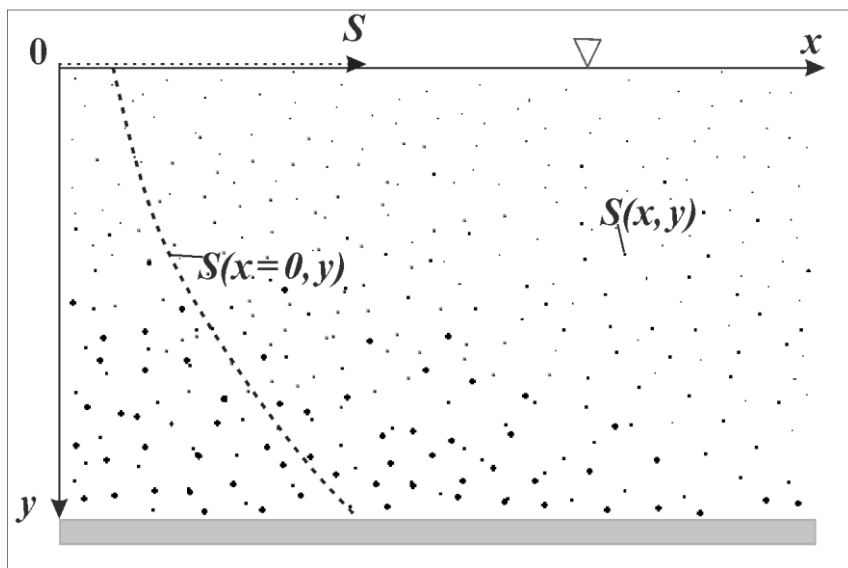


Рис. 1. Распределение осреднённой по ширине потока мутности воды и эпюра мутности

Решение уравнения (1) включает осреднение мутности воды по ширине потока, а далее с учётом принятых допущений преобразуется в линейное дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка, для решения которого в качестве граничного условия используется уравнение вертикального распределения мутности В.М. Маккавеева [1931]. В итоге получаем двумерное распределение содержания взвешенных частиц по длине x и глубине y потока:

$$S(x, y) = k_1 \exp\left(-\frac{k}{hv}(\omega x - v_{cp} y)\right), \quad (2)$$

где

$$k_1 = \frac{S_d}{\exp(k)}, \quad (3)$$

$$k = C \frac{\omega}{v_{cp}}, \quad (4)$$

$$C = \frac{2mC_{III}}{g} \approx 4,88C_{III}, \quad (5)$$

v_{cp} – средняя скорость течения, S_d – мутность воды в придонном слое, $m = 24$ – параметр параболы Базена по Буссинеску, g – ускорение свободного падения, C_{III} – коэффициент Шези.

Применение уравнения (2) ограничено наличием достаточных исходных данных. Зачастую исследователей при получении конечного решения интересует только средняя мутность воды в поперечном сечении потока. Тогда распределение осреднённой в поперечном сечении мутности воды вдоль реки $S(x)$ находим путём осреднения уравнения (2) по глубине потока и его дальнейшего дифференцирования. В результате получаем конечный вид уравнения [Премахова, 2016]:

$$S(x) = S_0 \exp\left(-\frac{C}{h}\left(\frac{\omega}{v_{cp}}\right)^2 x\right), \quad (6)$$

где S_0 – начальная мутность на верхней границе участка.

Поскольку взвешенные наносы в потоке представлены частицами разного диаметра и переносятся на различное расстояние от начального створа, то расчёт продольного переноса мутности по формуле (6) целесообразно вести отдельно для частиц i -й фракции, которые формируют частную мутность $s_i = S\alpha_i / 100$, где α_i – содержание частиц (%). Тогда общая искомая мутность находится по уравнению [Алексеевский, 2006]:

$$S = \sum_{i=1}^n s_i, \quad (7)$$

в котором n соответствует числу фракций.

Эффективность уравнения (6) проверена при моделировании распределения мутности воды вдоль участков рек ниже техногенных источников поступления наносов в районе добычи россыпных драгоценных металлов на реках Левтыринываяме и Пенистом в бассейне р. Вывенки (Камчатка), на р. Тууле в бассейне р. Селенги (Монголия) и в районе прокладки трубопровода через р. Авачу (Камчатка).

Расчёт и визуализация результатов проводилась с помощью программного комплекса Mathcad 14.0. Гидравлическая крупность частиц определялась по таблице В.В. Романовского [Караушев, 1977]. Грануло-

метрический состав взвешенных наносов определён на лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22.

В результате расчётов модельная мутность по длине р. Левтыринываяма при максимальной интенсивности работы предприятия снижается к контрольному створу всего на $5,4 \text{ г/м}^3$, что соответствует абсолютной погрешности $\Delta S = 6,3 \text{ г/м}^3$ и относительной погрешности $\delta = 29\%$. В условиях снижения добычи платины мутность по длине реки уменьшается интенсивней вследствие увеличения доли пылеватых и песчаных частиц на 25%; в этом случае точность расчётов оказывается выше: $\Delta S = -2,1 \text{ г/м}^3$, $\delta = -11\%$ (рис. 2).

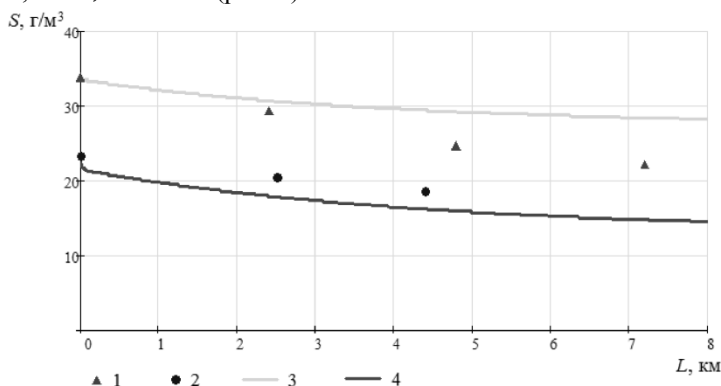


Рис. 2. Изменение фактической (1, 2) и расчётной мутности (3, 4) по длине L р. Левтыринываяма при интенсивной добыче россыпной платины (1, 3) и при её снижении (2, 4)

После рекультивации участка добычи россыпной платины в долине ручья Пенистого его воды продолжают размывать отложения бывших илоотстойников, что приводит к дополнительному поступлению илисто-глинистых частиц в поток. Согласно расчётным оценкам мутность в реке при выходе с нарушенных территорий снижается на $7,1 \text{ г/м}^3$, что на 18% или на $2,0 \text{ г/м}^3$ превышает фактические данные.

Расчёт распределения мутности в р. Тууле проводился для условий межени и паводков. При повышенной водности полученные результаты показали хорошую сходимость с фактическими значениями: $\delta = -6\%$, $\Delta S = -8 \text{ г/м}^3$. Это означает, что добыча золота на месторождении «Заамар» является доминирующим источником поступления взвешенных наносов во время паводков на исследуемом участке реки. При низком стоке воды оценка мутности оказалась менее точной: в конечном створе её величина на $24,1 \text{ г/м}^3$ превысила фактическую мутность, $\delta = -31\%$, что может быть

связано с дополнительными источниками взвешенных наносов на рассматриваемом участке р. Туула, например, с размывами русла.

Модель распространения мутности вдоль потока применялась для оценки влияния прокладки траншеи трубопровода через русло р. Авачи ниже п. Северные Коряки. Расчёт проводился отдельно для трёх рукавов в соответствии с режимом работы экскаваторов. При разработке траншеи в основном русле абсолютная погрешность измерений составила всего $0,6 \text{ г/м}^3$ ($\delta = 9\%$), что сопоставимо с ошибкой измерения весовой мутности. Для правой протоки ошибка расчётов $\Delta S = -3,0 \text{ г/м}^3$, $\delta = -17\%$, для левой протоки с учётом смещения с водами основного русла результаты расчётов оказались на $1,67 \text{ г/м}^3$ меньше фактической мутности, а $\delta = -18\%$.

Для рассмотренных объектов точность расчётов изменяется от 6 до 31%. Применение формулы (6) перспективно не только для оценки хозяйственной нагрузки на водотоки, но и для её прогноза. Изменяя начальные условия (величину мутности, гранулометрический состав взвешенных частиц, гидравлические условия потока), можно получить серии номограмм для прогнозирования характера распределения мутности воды в реке в зависимости от режима техногенного воздействия. Например, для р. Летвыринываяма такие расчёты проведены для ситуации, когда в межень в водный поток может сбрасываться разное количество промытой породы, имеющей постоянный гранулометрический состав (рис. 3).

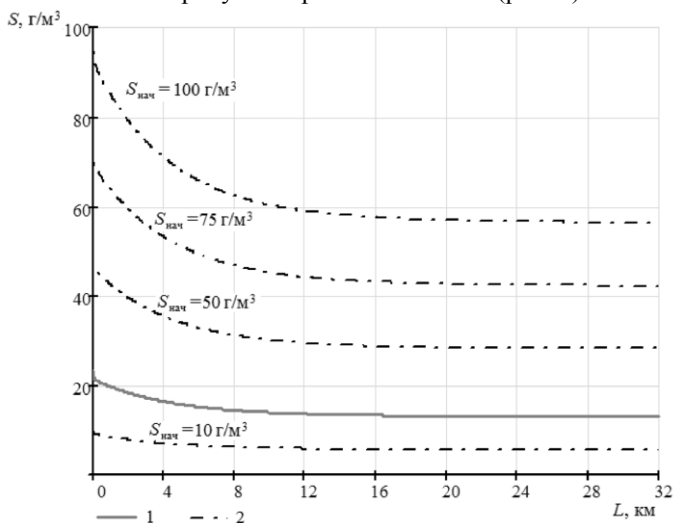


Рис. 3. Изменение расчётной фактической (1) и прогнозной (2) мутности при постоянном гранулометрическом составе взвешенных частиц и различной начальной мутности $S_{\text{нач}}$ по длине L р. Летвыринываяма в условиях снижения добычи россыпной платины

В общем случае полученные уравнения переноса взвешенных частиц (2, 6) могут быть применены для расчётов распространения в водных потоках консервативных нерастворимых примесей.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеевский Н.И.* Гидрофизика. М.: Академия, 2006. 176 с.
- Баула В.А.* Упрощенный метод определения границ зон мутности при работе земснарядов // Развитие внутренних водных путей Сибири и Саха (Якутии). Новосибирск: Изд-во НГАСВ, 1994. С. 100–108.
- Гиргидов А.Д.* Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 544 с.
- Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. СПб.: Глобус, 2012. 140 с.
- Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. Л: Гидрометеоздат, 1977. 272 с.
- Маккавеев В.М.* К теории турбулентного режима взвешенных наносов // Изв. ГГИ. 1931, 32, с. 5–26.
- Промыхова Е.В.* Изменчивость мутности речных вод в разные фазы водного режима: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27. – М., 2016. – 228 с.
- Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод / Государственный гидрологический институт Госкомгидромета. М.: Стройиздат, 1981. 224 с.
- Ackers P., White W.R.* Sediment Transport: New Approach and Analysis // Journal of the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers. 1973, 99, 11, pp. 2040–2060.
- Engelund F., Hansen E.* A monograph on sediment transport in alluvial streams. Copenhagen (Denmark): TekniskForlag, 1967. 62 p.
- Graf W.H., Acaroglu E.R.* Sediment transport in conveyance systems (Part I). A physical model for sediment transport in conveyance systems // International Association of Scientific Hydrology. 1968, 13, 2, pp. 20–39.
- Toffaletti F.B.* A Procedure for Computation of Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface // Technical Report. Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers, 1968. 21 p.
- Yang C.T.* Incipient Motion and Sediment Transport // Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers. 1973, 99, 10, pp. 1679–1704.