

А.С. Чеботарев

**ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ПРИ САМОРАЗМЫВЕ РЕЧНОГО РУСЛА (на примере р. Мзымты)**

A.S. Chebotarev

**STUDIES OF TRANSFORMATION OF BED MATERIAL GRAIN
SIZE COMPOSITION UNDER THE FORMATION RIVER BED
ARMOURING LAYER**

В статье представлены результаты экспериментов по изучению процесса саморазмыва и образования самоотмостки дна в условиях однонаправленного, общего размыва русла без подачи руслового материала в начале лотка в ходе эксперимента. Это соответствует условиям техногенного сужения русла р. Мзымты, когда за счет увеличения скоростей течения ускоряется процесс размыва дна в проектном русле, а количество и состав наносов меняется в ходе опытов в процессе размыва русла. Полученные в результате исследования количественные характеристики образования самоотмостки связаны с процессом трансформации продольного профиля и характеристиками размыва дна и расходом донных наносов при проектном сужении русла р. Мзымты.

Ключевые слова: транспорт наносов, русловые деформации, начальная скорость движения, интенсивность транспорта, расход донных наносов, самоотмостка, гранулометрический состав донных отложений, саморазмыв речного дна, транспортирующая способность, деформируемая модель, профиль дна.

The results of experiments devoted to the process of the river bed scouring and armouring under the conditions of the abrupt contraction of the Mzymta River are presented in the article. Due to the flow velocity increasing, the process of the bed scouring is accelerating accompanying with the river bed and water surface profile transformation changing of the bed material composition and bed load discharge characteristics.

Key words: bed load transport, river bed deformation, incipient motion, transport intensity, bed load discharge, bed armouring, bed material composition, stream channel degradation, transport capacity, mobile model, river bed profile.

Одной из основных причин низкой точности методов расчета таких характеристик транспорта наносов и русловых деформаций как начальная скорость движения, интенсивность их транспорта, виды и формы движения, расход донных наносов, образование, трансформация и движение русловых форм, их геометрические и динамические характеристики является недостаточная изученность процессов и закономерностей изменения гранулометрического состава донных наносов (сортировка наносов и образование самоотмостки дна) при взаимодействии турбулентного руслового потока с подстилающей зернистой поверхностью русла. Наиболее сложным и недостаточно изученным вопросом сортировки частиц донных отложений при их интенсивном движении является процесс образования самоотмостки (укрупнение состава донных отложений) при необратимых деформациях речного русла. Этой проблеме посвящено мало

работ. В качестве удачного примера лабораторных исследований самоотмостки дна при размыве русла можно назвать работу [1]. Большинство же работ включая работы, выполненные в ГГИ [2, 3] были направлены на изучение процесса формирования гранулометрического состава донных отложений при обратимых русловых деформациях в состоянии динамического равновесия потока и русла.

В статье представлены результаты опытов, выполненных автором в 8-метровом гидравлическом лотке в русловой лаборатории ГГИ с целью изучения механизма и деталей формирования гранулометрического состава донных отложений в процессе необратимых русловых деформаций при саморазмыве речного дна. Эти исследования были выполнены в составе НИР по научному обоснованию проекта канализации русла р. Мзымты в районе пос. Эсто-Садок в 46 км от ее устья, в связи с проектом строительства здесь олимпийской деревни.

В соответствии с отмеченным проектом паводочное русло реки должно быть сужено в 3-4 раза на участке длиной 2,6 км и освободившаяся территория застраивается объектами олимпийской деревни.

При отмеченном резком сужении русла на границе сопряжения его участков с естественной и уменьшенной проектной шириной потока следует ожидать резкого увеличения скоростей на участке сужения и, соответственно, транспортирующей способности (расхода донных наносов). Это приведет к нарушению баланса донных наносов и размыву русла в проектом сечении. Процесс размыва в суженном русле будет происходить в режиме однонаправленного, необратимого размыва дна, поскольку расход наносов не будет компенсироваться поступлением такого же количества наносов из выше расположенного участка русла.

При разнофракционном составе донных отложений по мере размыва русла и увеличения глубины потока в проектом сечении следует ожидать укрупнения донных отложений и уменьшения, а затем затухания и стабилизации размыва дна. Описать этот процесс количественно, теоретически ввиду его чрезвычайной сложности не представляется возможным, но его можно воспроизвести и изучить экспериментально.

Исследования характеристик руслового и гидравлического режимов проектируемого русла р. Мзымты в 8-метровом гидравлическом лотке были организованы параллельно с исследованиями на гидравлической, пространственной, неискаженной, деформируемой модели проектируемого участка русла этой реки длиной 2,6 км.

Опыты в 8-метровом лотке преследовали целью изучение характера и процесса трансформации дна канализованного русла р. Мзымты в проектных условиях в плоской постановке задачи в условиях отсутствия подачи наносов в начальном створе (саморазмыва). При этом при разных расходах воды (наполнении русла) решались задачи установления пропускной способности, характера трансформации дна и водной поверхности, условий начала движения и форм транспорта наносов, расхода наносов и развития процесса самоотмостки

дна в ходе трансформации его продольного профиля.

В принятом масштабе 1:50 полная длина лотка 8,0 м соответствовала участку р. Мзымты длиной 400 м, а ширина лотка 0,208 м имитировала ширину струи на этой реке 10,4 м. Общий вид 8-метрового гидравлического лотка представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид 8-метрового гидравлического лотка

Русловой лоток имеет стеклянные боковые стенки и стеклянное дно. Длина лотка 8 м, ширина 0,21 м, высота стенок 0,25 м, уклон дна прямой до 0,025, обратный до 0,015, расход воды оборотного водоснабжения до 0,012 м³/с. Для измерения гидравлических характеристик потока (расхода, глубины, уклона) лоток оборудован треугольным водосливом ($\theta = 90^\circ$) и стационарными и переносными тастерами, позволяющими сделать отсчет уровня с точностью до 0,1 мм. Для измерения глубины потока в лотке, уклона дна и свободной поверхности применялся переносной тастер. В этом случае отсчеты по линейке производились с помощью нивелира, закрепленного на неподвижном кронштейне. Лоток оборудован также устройствами для автоматического воспроизведения гидрографа стока по заданной программе, подачи наносов, регистрации их количества и возврата в начальный створ лотка, устройствами для выполнения следящей фото- и киносъемки.

В малом гидравлическом лотке было выполнено 17 опытов. Эксперименты отличались величиной расходов воды и, соответственно, наполнения русла. В ходе опытов и после каждого из них измерялись положение профиля дна и водной поверхности, глубина и скорость потока, продолжительность опыта,

объем и масса материала, вынесенного в песколовку. После каждого опыта для последующего анализа в разных поперечных сечениях с поверхности дна лотка брались пробы донных отложений наносов в слое толщиной не более 2-3 частиц. После каждого опыта брались также пробы наносов из песколовки. Исходный состав грунта экспериментального материала соответствовал составу, используемому в опытах на пространственной гидравлической модели исследуемого участка р. Мзымты, построенного в большом зале русловой лаборатории.

Проектное русло участка р. Мзымты в 8-метровом гидравлическом лотке и на большой пространственно-гидравлической модели моделировалось в едином плановом и вертикальном (α_L , α_B , α_H) масштабах 1:50. При этом же масштабе обеспечивается моделирование донных отложений α_d .

В соответствии с методикой гидравлического моделирования речных русел с крупным составом речного аллювия [4] условие геометрического подобия выражается соотношением

$$\alpha_L = \alpha_B = \alpha_H = \alpha_d. \quad (1)$$

Условие кинематического подобия, выражается соотношением:

$$\text{Re}_M > \text{Re}_{\text{кр}}, \quad (2)$$

где
$$\text{Re}_M = \frac{U_M H_M}{\nu}, \quad (3)$$

здесь Re_M – число Рейнольдса модели; U_M – характерная скорость потока на модели; H_M – характерная глубина потока на модели; ν – кинематический коэффициент вязкости воды; $\text{Re}_{\text{кр}} = 300-1500$ – критическое значение числа Рейнольдса, разграничивающее потоки ламинарного и турбулентного режимов течения (модельный поток, как и натуральный поток, должен быть турбулентным).

Условие динамического подобия выражается соотношением

$$\text{Fr} = \text{idem}, \quad (4)$$

где Fr – число Фруда, определяемое по формуле

$$\text{Fr} = \frac{U}{\sqrt{gH}}, \quad (5)$$

g – ускорение свободного падения. Остальные символы перечислены выше.

Условие (4) с учетом (5) приводит к соотношению для масштабного множителя при пересчете модельных значений скорости течения в натурные значения

$$\alpha_U = \sqrt{\alpha_H}, \quad (6)$$

где α_U – масштабный множитель для пересчета модельных значений скорости потока в натуру; α_H – масштабный множитель для пересчета модельных значений глубин-высот в натурные значения;

Условие подобия русловых наносов и их подвижности выражается соотношением

$$d/H = idem, \tag{7}$$

где d – характерный диаметр русловых наносов.

Таким образом, с учетом принятого масштаба модели, равного 1:50, и отношения (6), получаем, что для различных характеристик масштабные множители составили от 7 до 17 675.

Моделируемая в лотке натурная глубина потока возрастала от 0,75 м в опыте 1 до 2,75 в опыте 7 и затем составила 2,4 м в опытах 14–17. При этом скорость потока и расход воды (в пересчете на полную ширину проектируемого русла в натуре) возрастали соответственно от 1,36 до 4,46 м/с и от 42,4 до 445,0 м³/с. Технические возможности лотка не давали возможность воспроизводить расходы воды более 467 м³/с. Число Фруда в опытах при различных наполнениях русла менялось от 0,50 до 1,14. Продолжительность опытов в пересчете на натуру менялась в диапазоне 0,35–10,6 ч.

На рис. 2 представлены продольные профили дна и водной поверхности в опытах 1–17 в сравнении с исходной поверхностью дна и профилем водной поверхности при исходном дне с глубинами 4,8 и 5,0 см.

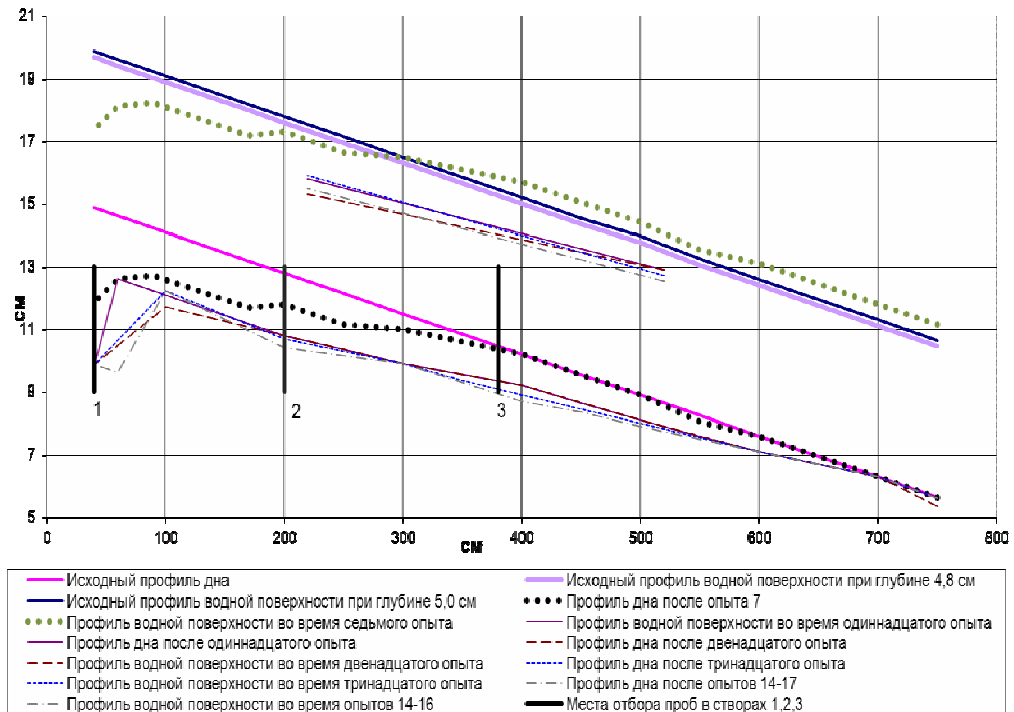


Рис. 2. Профили дна и водной поверхности потока во время выполнения опытов в 8-метровом гидравлическом лотке

На рис. 2 можно видеть различные стадии размыва продольного профиля дна и понижения уровня воды в ходе экспериментов 1–17. Так, после опыта 7

отметка дна в зоне размыва в начале лотка понизилась на 2,5 см (1,25 м в натуре), а после опытов 13–17 общий размыв русла в начале лотка составил 5 см (2,5 м природы) и достиг стеклянного дна лотка. Размыв дна по длине участка после опыта 7 составил в пересчете на природу 400 м, а после опытов 11–17 размыв охватил всю длину экспериментального участка длиной 750 м в пересчете на натурные условия.

На рис. 3 представлены экспериментальные гидрографы стока воды и наносов в проектном русле р. Мзымты и в пересчете на натурные условия.

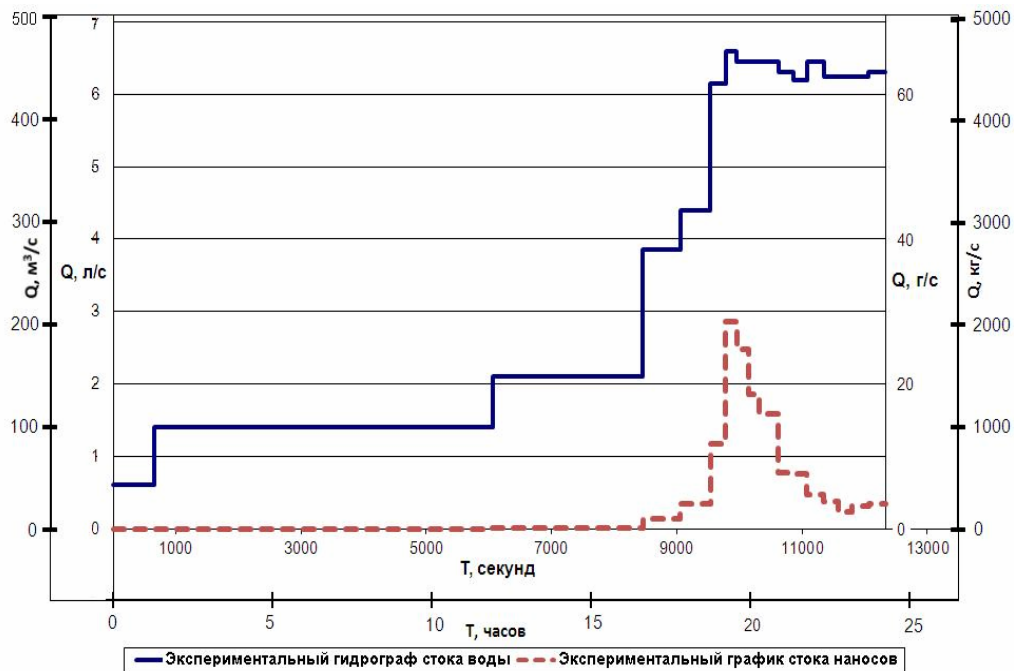


Рис. 3. Экспериментальные гидрографы стока воды и наносов в проектном русле р. Мзымты по данным опытов в 8-метровом гидравлическом лотке и в пересчете на натурные условия

Расход донных наносов достигает своего максимума в опыте 7, а затем последовательно существенно снижается, несмотря на то, что расход воды остается тем же. Это происходит в результате самоотмстки русла в процессе его размыва (саморазмыва).

Образование самоотмстки в ходе эксперимента наглядно демонстрируется на рис. 4 и 5. Для всех проб гранулометрических составов донных отложений, взятых в различных точках продольного профиля дна и в песколовке, наблюдается рост всех характерных диаметров донных отложений.

Более детально трансформация гранулометрических составов донных отложений в ходе экспериментов 1–17 представлена на рис. 6, 7.

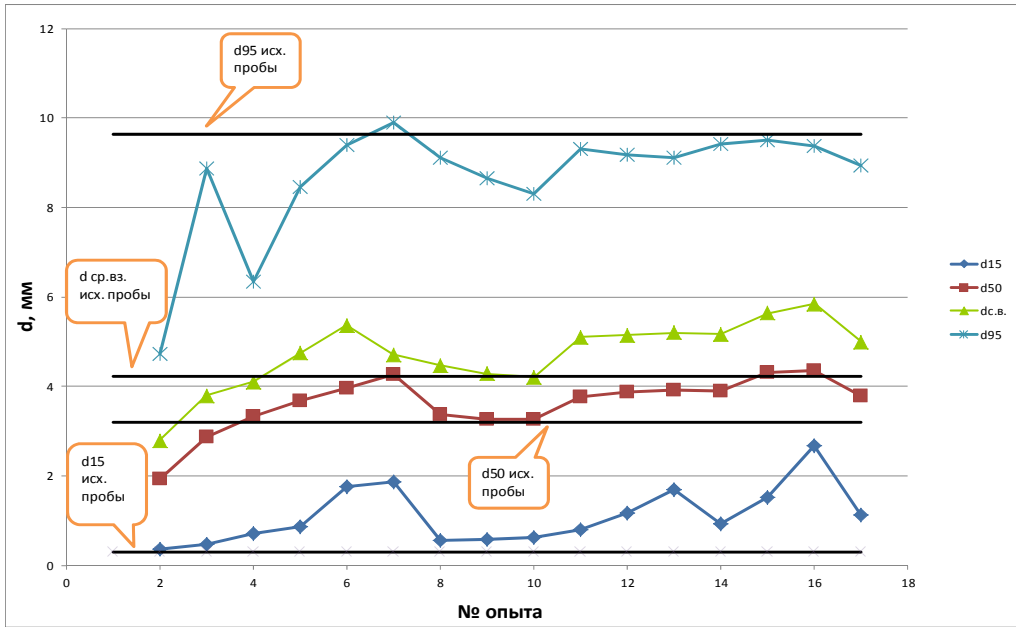


Рис. 4. Динамика изменения характеристик гранулометрического состава донных наносов после опытов 2–17 в песколловке

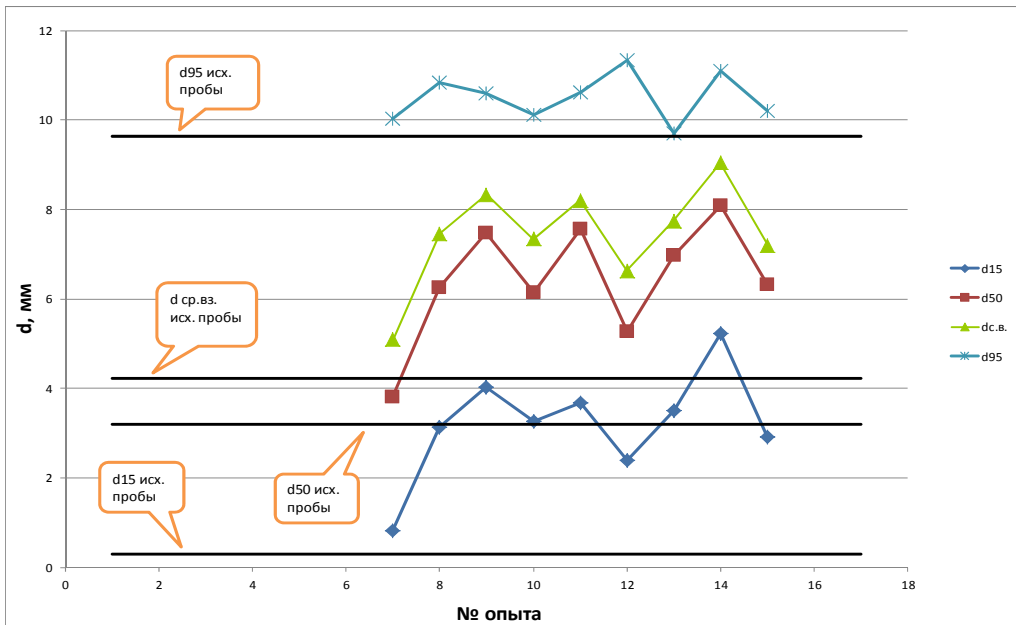


Рис. 5. Динамика изменений характеристик гранулометрического состава донных наносов после опытов 7–15 в зоне размыва (створ 1 на рис. 2)

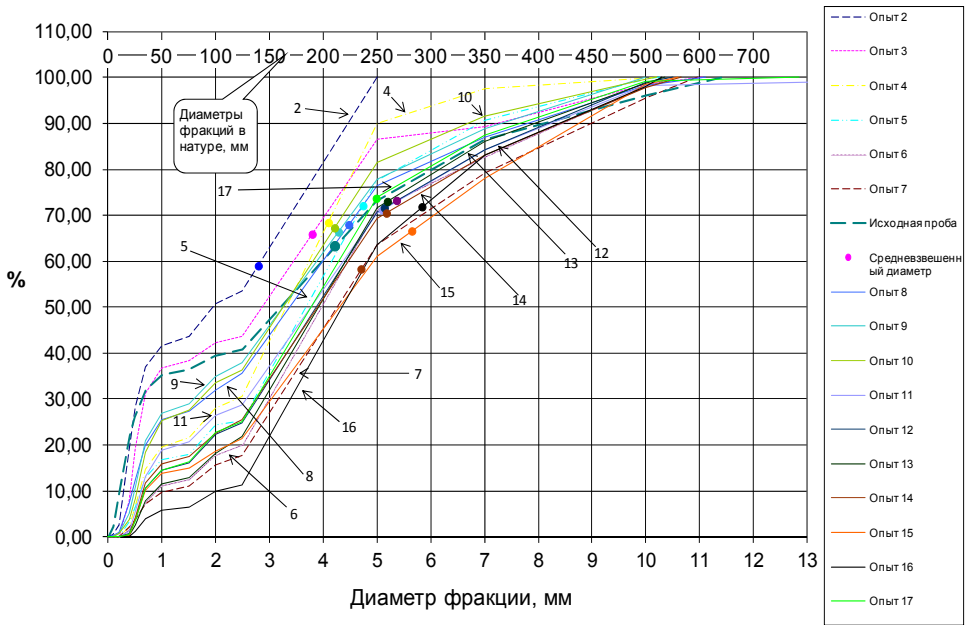


Рис. 6. Динамика изменения характеристик гранулометрического состава донных наносов после опытов 2-17 в песковке

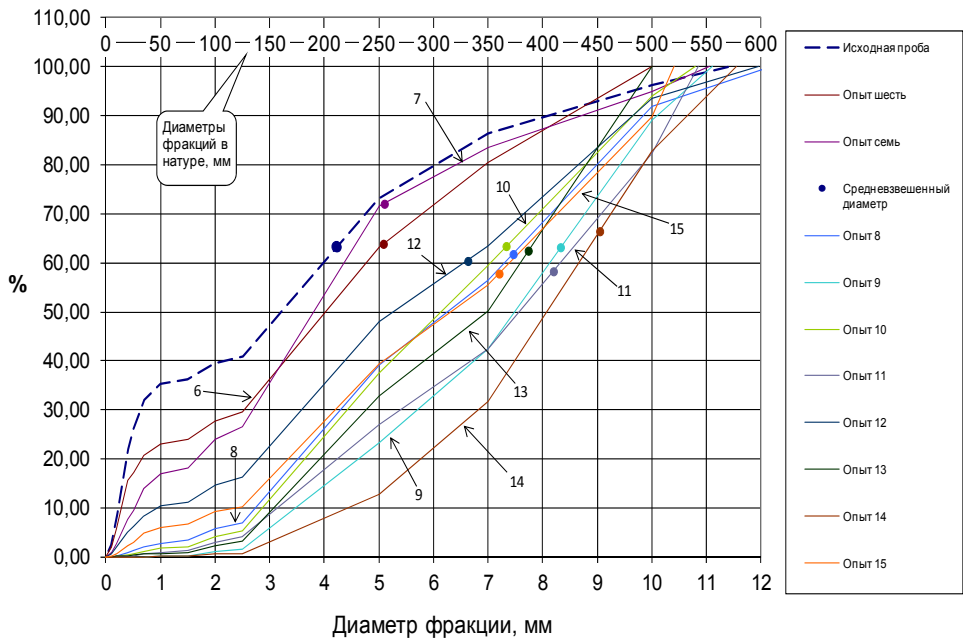


Рис. 7. Динамика изменения характеристик гранулометрического состава донных отложений в ходе опытов 7-15 (зона размыва, створ 1)

В результате настоящего исследования в 8-метровом гидравлическом лотке в плоской постановке задачи процесса трансформации русла на участке проектируемого канализованного участка р. Мзымты были получены взаимосвязанные и взаимообусловленные характеристики изменения продольного профиля дна и водной поверхности, динамики и величины общего размыва русла, изменения расхода донных наносов в ходе общего размыва дна и изменения гранулометрического состава донных отложений (образования самоотмостки дна) во времени и в пространстве в ходе трансформации русла р. Мзымты при реализации проекта ее канализации на участке реки у пос. Эсто-Садок. Исследование описывает процесс образования самоотмостки дна количественно и таким образом дает возможность для прогнозирования процесса трансформации русла. Это представляется важным при составлении проекта берегоукрепительных и дноукрепительных работ. В исследованном и подобном исследованному случаях, когда параметры потока и состав донных отложений предполагают образование самоотмостки дна, возможно существенное сокращение в расходах на возведение искусственных укрепительных сооружений. Таким образом, результаты могут быть использованы для совершенствования методов расчета характеристик транспорта наносов в руслах рек в части учета гранулометрического состава донных наносов.

Литература

1. *Кнороз В.С.* Образование естественной отмостки при размыве русла // Гидротехническое строительство, 1956, № 4, с. 45-48.
2. *Копалиани З.Д.* Лабораторные исследования закономерностей формирования состава наносов на размываемых моделях речных русел // Труды ГГИ. Вып. 278. –Л.: Гидрометеиздат, 1982, с. 70-88.
3. *Чеботарев А.С.* Лабораторные исследования закономерностей формирования гранулометрического состава донных отложений в речных излучинах // Журнал ун-та водн. коммуникаций. Вып 2(6), 2010, с. 132-143.
4. *Kopaliani Z.D., Tvalavadze O.A., Noselidze G.A.* Methodology for Hydraulic modelling of river channels in mountain-piedmont zone in case of structural forms of bedload transport. Proc. Of Intern. Symposium «East-West, North-South Ehcounter on the state-of-the art in River Eng. Methods and Design Philosophies. St. Petersburg. 1994, pp. 209-219.