

Деформации криволинейных русел, подверженных термоэрозии (по данным лабораторных и численных экспериментов)

Дебольская Елена Ивановна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт водных проблем РАН (ИВП РАН) (г. Москва)

Введение: Работа посвящена исследованию деформации криволинейных участков русел рек, протекающих в условиях криолитозоны, при одновременном воздействии водного потока и термоэрозии. Представлена математическая модель, состоящая из трех блоков: термического, гидродинамического, и деформационного. Модель тестировалась по данным лабораторных экспериментов.

В предыдущих исследованиях, основанных на результатах лабораторных и численных экспериментов, проведенных ранее авторами [1-5], были рассмотрены случаи прямолинейного русла с замороженным участком берегового склона и с ледяными пластинами, помещенными в склон. Первому случаю соответствовала гомогенная математическая модель, второму – гетерогенная. В настоящей работе исследуются деформационные процессы на криволинейных участках русла, при этом в новой версии математической модели могут быть учтены оба случая.

Лабораторные эксперименты

При проведении лабораторных экспериментов был использован круговой лоток (рис. 1), оснащенный волнопродуктором и изготовленный из оргстекла (плексигласа) толщиной 8 мм, диаметром 1,5 м и высотой 0,4 м.

Максимальный объем заполнения емкости 700 литров, рабочий объем 620 литров. При проведении экспериментов замораживалась часть берегового склона, расположенная на внешнем диаметре, и исследовались его деформации после прохождения волнового воздействия. Уклон сформированного в начале экспериментов берегового откоса α изменялся в диапазоне 19° - 29° , температура воды в лотке поддерживалась постоянной 10°C . В соответствии с лабораторным экспериментом в математической модели задавалось трапециевидное поперечное сечение русла с углом заложения берегового склона α .



Рис. 1 Круговой лоток

Математическая модель

Для задания входных параметров задачи в математической модели в соответствии с данными лабораторного

эксперимента были получены расчетные соотношения для определения расхода воды, или условного уклона дна лотка, или глубины потока в зависимости от требований численного эксперимента.

В гидродинамическом блоке модели на первом этапе исследований был рассмотрен стационарный случай водного потока с заданием постоянных расхода и начальной глубины. Форма русла изменялась в соответствии с синусоидальной зависимостью ширины русла от длины. Каждому виду соответствовал коэффициент формы k_f : 0 соответствует прямому руслу, 1 – половине синусоиды при ее возрастании (вогнутый берег), -1 – половине синусоиды при ее убывании (выпуклый берег), 2 – целой синусоиде.

В деформационном модуле рассчитываются изменения отметок дна из уравнения русловых деформаций (закона сохранения массы переносимых наносов). На твердых границах и на правой границе (приемный резервуар) задавались нулевые потоки расходов, на левой (входной) границе варьировались в зависимости от режима поступления воды. В расчетах, соответствующих данным лабораторного эксперимента, на входной границе задавался нулевой расход наносов, так как в лабораторной установке всегда поступала чистая вода. Для замыкания использовалась наиболее простая зависимость Энгелунда, не предусматривающая деление наносов на взвешенные и донные. В данной версии модели в уравнения русловых деформаций был введен параметр льдистости грунта, который позволил учитывать одновременно замороженный грунт и ледовые пластины в одной модели.

В тепловом модуле для расчета температур грунта используется однородное уравнение теплопроводности, для расчета перемещения границы раздела "вода-грунт" – уравнение Стефана. Температура воды в условиях лабораторного эксперимента остается неизменной в течение всего времени его проведения. В математической модели в начальный момент времени во всем грунте задается отрицательная температура, в водном потоке положительная.

Результаты

В левой части рис. 2 представлена фотография результата лабораторного эксперимента по размыву замороженного участка грунта, расположенного на вогнутом берегу, в правой части – поверхность русла, рассчитанная для тех же условий с использованием математической модели.

На рис. 3 представлены результаты измерений (а) и расчетов (б) глубин протаивания выпуклого и вогнутого берегов при скорости потока 0.1 м/с.

Как лабораторные, так и численные эксперименты показали, что глубина протаивания выпуклого берега увеличивается несколько быстрее, чем вогнутого. На рис. 4 представлены результаты численных расчетов деформаций выпуклого, вогнутого и прямого берега при трех равных участках замерзшего грунта, расположенных на равных расстояниях по длине, от коэффициента льдистости грунта (единица соответствует ледяной пластине). Начальная температура грунта или льда задавалась равной -5°C .

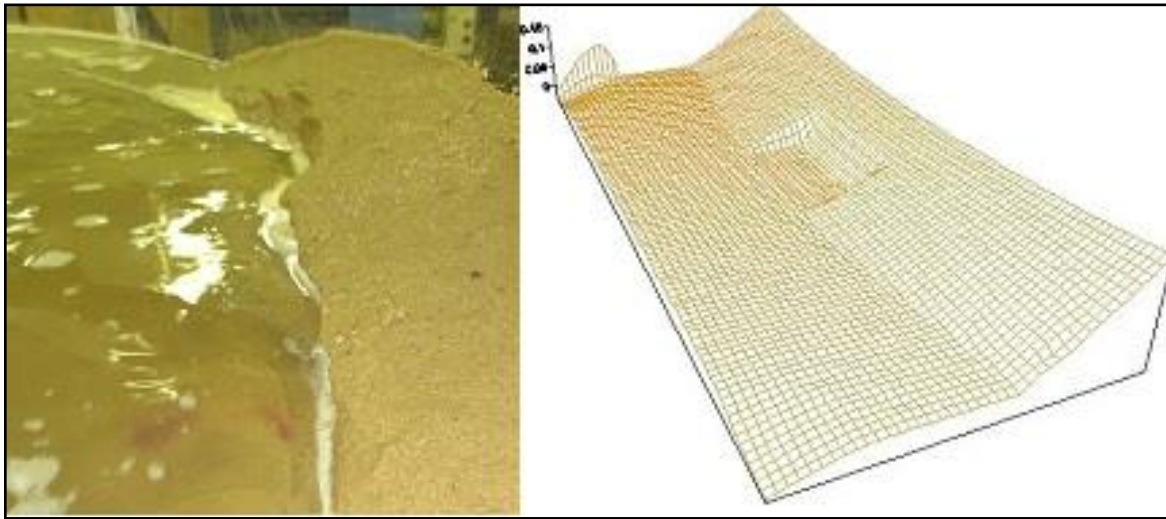


Рис. 2 Качественное сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов.

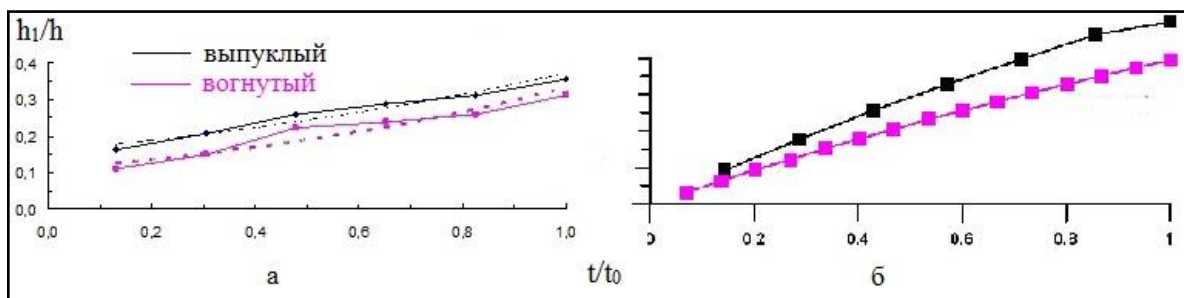


Рис. 3 Относительные значения глубин протаивания в зависимости от относительного времени по данным лабораторных и численных экспериментов.

Величины средних значений размывов (рис. 4а) не сильно отличаются для выпуклого и прямого берега, при этом при всех формах русла размывы усиливаются с увеличением льдистости. Максимальные положительные значения деформаций (рис. 4б), характеризующие аккумуля-

цию наносов, практически не зависят от льдистости для прямого и выпуклого берегов и уменьшаются при увеличении льдистости для выпуклого берега. При этом их значения значительно превышают аккумуляции в случае прямого и вогнутого.

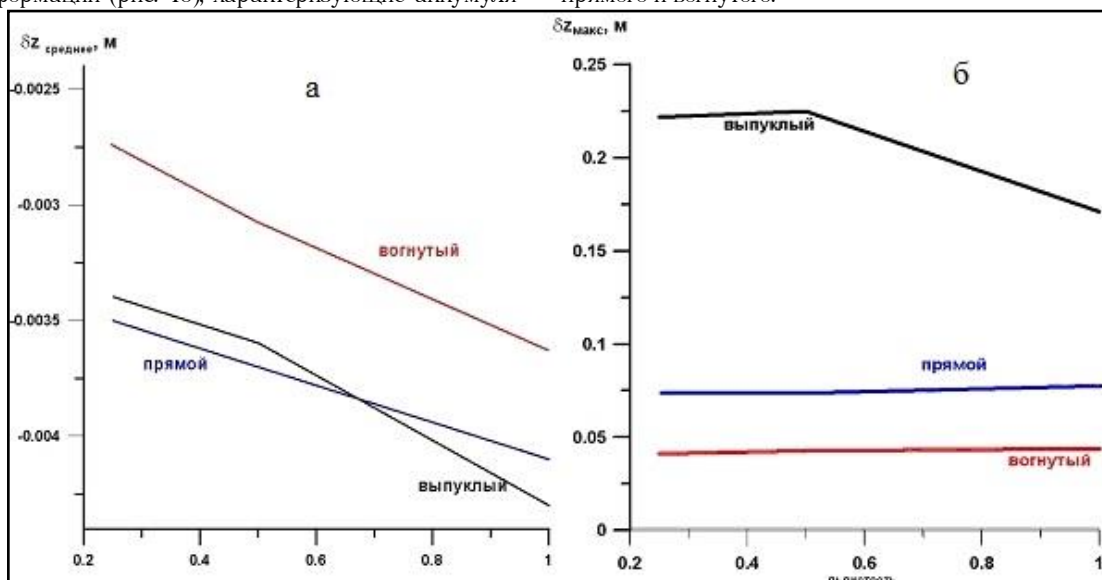


Рис. 4 Зависимость средних (а) и максимальных (б) по расчетному участку русла значений деформаций для случаев прямого, выпуклого и вогнутого берега от коэффициента льдистости.

Здесь представлена лишь малая часть результатов и выводов, полученных в ходе первых лабораторных и численных экспериментов. Основной вывод заключается в том, что разработанная модель адекватно отражает исследуемый процесс, что следует из сравнения данных числен-

ных и лабораторных экспериментов, и позволяет получить прогноз развития ситуаций в зависимости от многих параметров, учитываемых в ней.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-08-00595 и 18-05-00178).

Литература:

1. Дебольская, Е.И. Математическая модель русловых деформаций рек криолитозоны / Е.И. Дебольская // Водные ресурсы. — 2014. — Т. 41. — № 5. — С. — 496–506.
2. Дебольская, Е.И. Формирование ниш вытаивания и их воздействие на русловые деформации (математическая модель) / Е.И. Дебольская // Сборник трудов IV Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». — Рыбинск: Изд-во ИВП РАН, 2013. — С.160-169.
3. Дебольская, Е.И. Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды / Е.И. Дебольская, В.К. Дебольский, И.И. Грицук, О.Я. Масликова, Д.Н. Ионов // Лёд и Снег. — 2013. — № 1(121). — С. 104-111.
4. Дебольская, Елена. Модели процесса переноса в деформируемых руслах рек криолитозоны / Е.И. Дебольская. — LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. — 187 с.
5. Долгополова Е.Н., Оттаивание мерзлых грунтов при освоении районов в долинах и устьях рек криолитозоны / Е.Н. Долгополова, Д.Н. Ионов // Тр. Межд. Конфер. LXIX Герценовские чтения «География: развитие науки и образования» — СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2016. — С. 216 – 221.