



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Отчет по проекту

“ SETTING UP THE MODEL OF POLLUTANTS TRANSPORT AND WATER BALANCE
CALCULATION IN THE BAIKAL BASIN)”

(ПРОЕКТ ПРООН/ГЭФ «Комплексное управление природными ресурсами
трансграничной экосистемы бассейна Байкала»)

Итоговый отчет

Утверждаю

Заместитель декана по научной работе
географического факультета МГУ
Член-корр. РАН С.А. Добролюбов

Ответственный исполнитель

К.г.н С.Р. Чалов

МОСКВА 2014

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Организация-Исполнитель: Государственное учебно-научное учреждение Географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Руководитель работ:

доктор географических наук, академик РАН _____ Касимов Н. С.
подпись, дата

Отв. исполнитель работ

кандидат географических наук, без ученого звания _____ Чалов С.Р.
подпись, дата

Исполнители

Доктор географических наук, профессор _____ Алексеевский Н.И.
подпись, дата

кандидат географических наук, без ученого звания _____ Косицкий А.Г.
подпись, дата

кандидат географических наук, без ученого звания _____ Морейдо В.М.
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания _____ Романченко А.О.
подпись, дата

Оглавление

Оглавление

Оглавление.....	3
Введение	4
1. Описание программного комплекса HEC-RAS	5
2. Описание системы моделирования перемещения поллютантов р. Туул, Орхон и Селенга в программе HEC-RAS.....	10
2.1 Подготовка геометрических данных	10
2.2 Основной этап создания модели	14
3. Структура веб-страницы Байкальского информационного центра (БИЦ).....	17
4. Отчет об установке и внедрении модельного комплекса HEC-RAS в странах	19
4.1 Презентация и внедрение модельного комплекса HEC-RAS в г. Улан-Удэ	19
4.2 Презентация и внедрение модельного комплекса HEC-RAS в г. Улан-Батор.....	20

Введение

Данный отчет представляет собой итоговое обобщение мероприятий, выполненных в рамках реализации проекта "Setting up the model of pollutants transport and water balance calculation in the Baikal basin)" программы ПРООН-ГЭФ «Комплексное управление водными ресурсами трансграничной экосистемы бассейна Байкала».

В рамках выполнения проекта достигнуты следующие результаты:

- разработана система моделирования перемещения поллютантов в бассейне Селенги (на основе одномерного комплекса HEC-RAS и экспертно-аналитической системы).
- калибровка и верификации одномерной гидродинамической модели (HEC-RAS) для выбранных ключевых участков речной сети, расположенных в пределах наиболее опасных с точки зрения потенциального загрязнения участков речной сети в России и Монголии

Полная версия модели и технической документации к ней расположена по этой ссылке:

<http://yadi.sk/d/WmN-OMcMLX3fR>

Основные принципы работы с моделью были продемонстрированы в рамках специальных семинарах, проведенных 6 августа 2014 года в Байкальском институте природопользования Сибирского отделения РАН и 15 августа 2014 года в Национальном Водном комитете Монголии. В рамках этих семинаров была выполнена установка программного комплекса HEC-RAS и разработанной модели на компьютеры Байкальского Информационного Центра.

Завершающим этапом работы стала подготовка пакета визуализации сценарных результатов прогноза реакции речной сети на сайте Байкальского Информационного Центра (приложение 1 настоящего отчета).

При подготовке отчета использованы материалы института географии СО РАН (Россия) и Лимнологического института СО РАН (Россия), университета Стокгольма (Швеция), Гельмгольц-центра по окружающей среде (Германия).

Отчет подготовлен специалистами географического факультета МГУ и Института Водных проблем РАН.

1. Описание программного комплекса HEC-RAS

Система моделирования транспорта загрязнителей р. Селенга разработана на основе программного пакета HEC-RAS. Программа HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), разработана в Гидрологическом инженерном центре Корпуса гражданских инженеров армии США (U.S. Army Corps of Engineers, 1995). Программный комплекс реализует одномерный подход к гидравлическому моделированию речных потоков, работает в среде Windows и включает в себя графический интерфейс, компоненты гидравлического анализа, хранение и управление данными, графические и отчётные средства.

В версию программы HEC-RAS 4.1.0 входит четыре расчётных модуля:

- 1) расчёт профилей водной поверхности для установившегося движения воды;
- 2) расчёт неустановившегося движения воды;
- 3) моделирование транспорта наносов в деформируемых руслах;
- 4) анализ качества воды.

Для поставленной цели по оценке переноса загрязнителей для рек Туул и Орхон использовался модуль транспорта наносов. Для расчёта транспорта наносов используются три типа входных данных: геометрические, гидрологические и данные по наносам.

Расчёты транспорта наносов базируются на выходных данных блока расчёта движения воды, поэтому определенные части расчётов выполнялись в модуле установившегося движения воды.

Геометрические данные включают в себя: схему речной сети, на которой указываются названия рек и их частей (верхнее течение, нижнее и т.п.); поперечные профили для каждого из которых определяются параметры, учитывающие потерю на сопротивление, такие как коэффициенты шероховатости Маннинга, коэффициенты потери энергии на сжатие и расширение потока в связи с изменением морфометрии русла.

Геометрия потока моделируется путем задания его центральной линии и поперечных сечений с заданными пользователем расстояниями между ними. В поперечных сечениях, перпендикулярных центральной линии, задаются границы «мертвых» зон, где наблюдается стагнация речного течения.

На схеме речной сети можно указать места расположения мостов, гидротехнических сооружений, зданий и прирусловых валов.

К гидрологическим данным в первую очередь относятся расходы и уровни воды, задаваемые в виде кривых расходов на верхнем створе, а также температура воды.

Для моделирования транспорта наносов необходимо задать начальные и граничные условия, а также условия транспорта наносов. Необходимо выбрать одну из предложенных функций расчёта транспорта наносов (Тофалетти, Мейера-Питера, Акерса-Уайта, Янга и др.) или задать её вручную на основе полевых исследований, метод сортировки, метод расчета скорости осаждения частиц, ввести данные по гранулометрическому составу наносов (рис. 1.1).

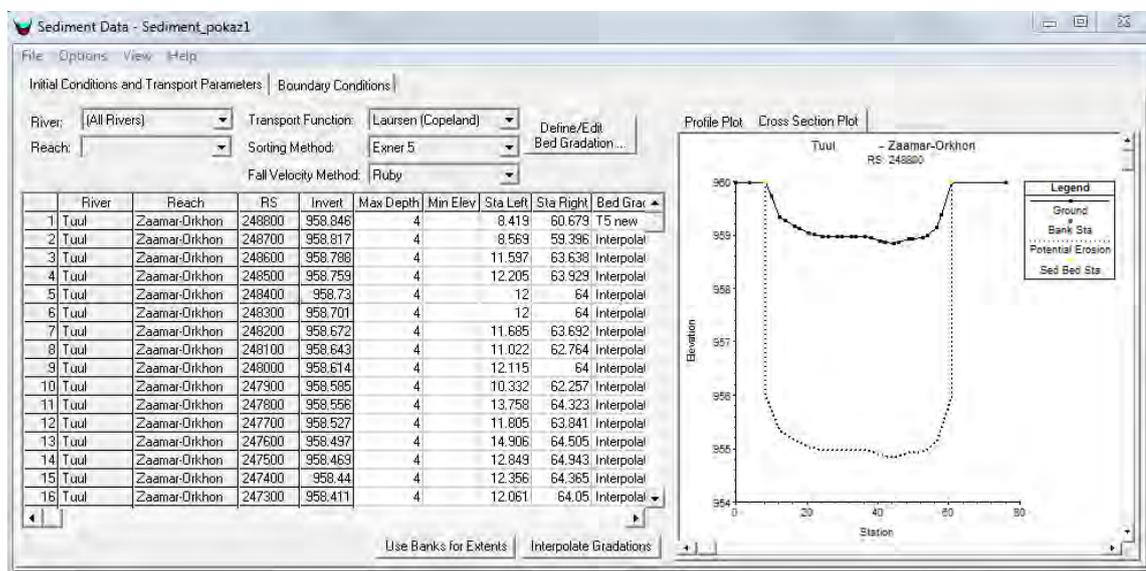


Рисунок 1.1 Окно ввода параметров наносов

Структура русловых отложений задаётся в зависимости от наличия отмостки (рис. 1.2). При наличии аллювиальной отмостки верхний слой представлен крупнообломочным материалом, который лимитирует эрозию в нижележащих слоях. Активными слоями в данном методе считаются верхний - покровный слой (cover layer) и подповерхностный слой (subsurface layer), ниже располагается неактивный слой дна (inactive layer). На данный момент «трехслойный» метод является основным в HEC-RAS (Gibson, 2006).

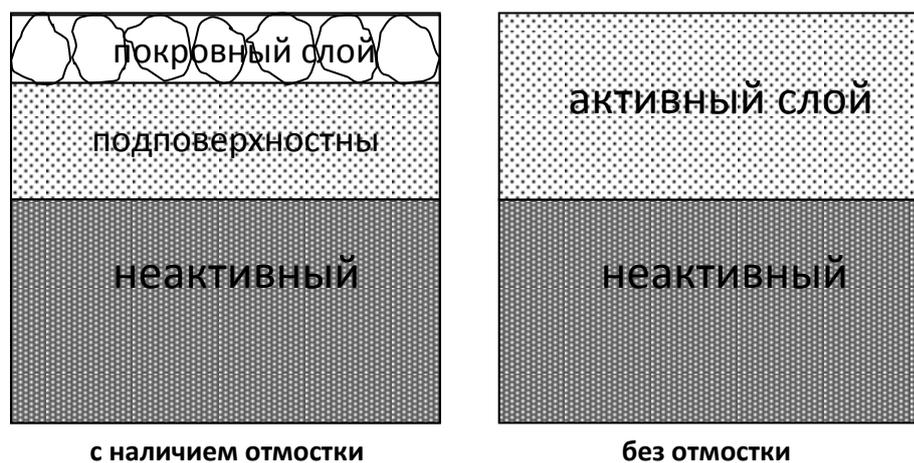


Рисунок 1.2 Методы сортировки наносов

Второй метод – упрощенный, с двумя слоями, толщина активного слоя задается равной d_{90} слоя, где d_{90} - такой диаметр, частицы с размером меньше которого занимают больше 90% русла. Данный метод подходит лишь для гравийных русел и предназначен для применения при использовании уравнения Вилкока.

Метод расчёта скорости осаждения частиц задается по одному из четырех способов: Toffaleti, Van Rijn, Rubey и Report-12. Один из методов выбирается в зависимости от коэффициента, учитывающего форму частиц, температуры и удельного веса частиц. Для метода Rubey скорость осаждения рассчитывается на основе закона Стокса.

Транспортирующая способность потока рассчитывается в каждом поперечном сечении на основе гидравлической информации, полученной в результате расчетов кривой свободной поверхности (т.е. данных о ширине, глубине, гидравлическом уклоне и скорости течения) и гранулометрического состава донного материала.

Расчёт транспорта наносов в программе ведется для различных размерных групп частиц. Транспортирующая способность для каждого размера частиц вычисляется с предположением, что данный класс занимает 100% донных отложений. Затем данное значение умножается на долю этого класса в составе. Путем суммирования вычисляется

общий транспорт наносов:
$$T_s = \sum_{j=1}^n \beta_j T_j$$
, где n - число размерных групп, β_j - процентное содержание группы j в составе наносов.

В программе существует используемая по умолчанию классификация гранулометрического состава, однако пользователь может ввести свою собственную классификацию. Далее вводятся данные по содержанию каждого класса в составе наносов.

Граничные условия задаются для одного или нескольких створов, выбирается один из трёх видов граничных условий: равновесное состояние, кривая расходов наносов, серии расходов наносов.

Первый вид граничных условий подходит лишь для верхнего створа, проводится подсчёт транспортирующей способности потока, которая принимается равной притоку наносов, таким образом, на данном поперечном профиле не будет происходить размыв или отложение наносов.

Кривая расходов представляет собой зависимость расхода наносов от расхода воды, данный тип граничных условий также применим только для верхнего створа. Вводятся значения расходов воды и наносов, а также сведения об их гранулометрическом составе.

Если расход наносов не привязан к верхнему створу, используются серии расходов наносов, в отличие от кривой расходов данный вид условий не зависит от вводимых граничных условий для квази-неустановившегося движения воды, на котором основывается подсчёт транспорта наносов.

Граничные условия для квази-неустановившегося движения задаются на двух на концах расчетного участка и, при необходимости, внутри него (внутренние граничные условия). Задаются серии расходов и расходов боковых притоков.

Для верхнего створа должны быть выбраны серии расходов, так же для любой серии должна быть указана продолжительность действия данного расхода воды. Так как транспорт наносов должен подсчитываться чаще, чем гидродинамические параметры, продолжительность расхода воды делится на периоды вычисления транспорта наносов (рис. 1.3).

Для замыкающего створа, как граничные условия используются: кривые расходов воды (зависимость расхода воды от уровня), серии отметок водной поверхности и нормальная глубина.

Для второго вида граничных условий задаются уровни воды и продолжительность каждого уровня. При выборе нормальной глубины, как граничного условия, вводится угол естественного откоса. Программа рассчитывает глубину на нижнем створе для каждой серии расходов путем решения уравнения Шези-Маннинга (гидравлический метод).

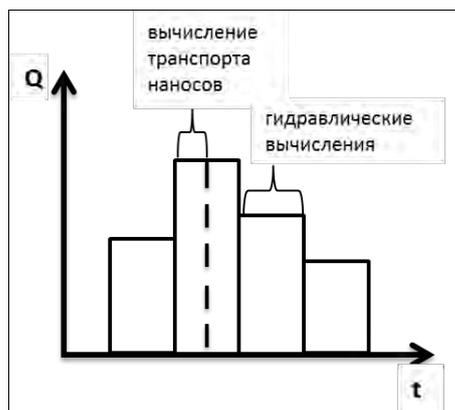


Рисунок 1.3 Периоды вычисления гидравлических параметров и транспорта наносов

Расчёт транспорта наносов можно представить схематически в следующем виде (рис.1.4).

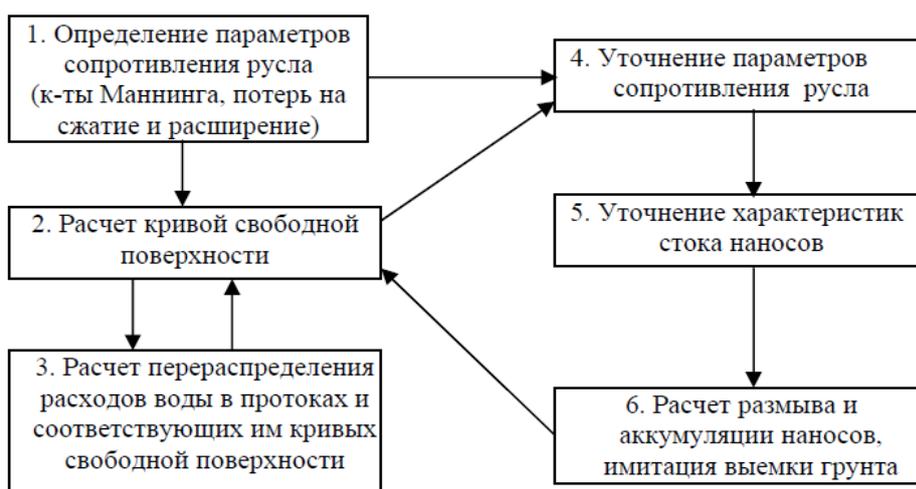


Рисунок 1.4 Схема вычисления транспорта наносов в программе HEC-RAS

Расчёт кривой свободной поверхности производится путем решения одномерного уравнения энергии (уравнения Бернулли). Как было описано выше, непрерывный гидрограф расходов воды имеет вид ступенчатого графика, представляющего последовательность расходов воды с различной продолжительностью стояния. Для каждого расхода воды рассчитывается продольный профиль водной поверхности и такие гидравлические характеристики, как гидравлический уклон, скорость, глубина потока в каждом поперечном сечении.

Транспортирующая способность потока рассчитывается в каждом поперечном сечении на основе гидравлической информации, полученной в результате расчетов кривой свободной поверхности и гранулометрического состава слагающего русло материала. Содержание наносов рассчитывается вниз по течению после расчетов профиля водной поверхности снизу вверх по течению для каждого временного шага, соответствующего каждому из заданных ступенчатым гидрографом расходов воды. Путем решения уравнения неразрывности Экснера оцениваются вертикальные деформации (положительные - в случае аккумуляции наносов или отрицательные - при размыве русла) на каждом участке между поперечными сечениями.

Далее рассчитывается размыв или отложение наносов и соответственно корректируется форма каждого поперечного сечения. Расчеты продолжаются с другим расходом воды согласно заданному ступенчатому гидрографу стока, и цикл повторяется, с обновленной морфологией русла. Расчеты деформаций выполняются по фракциям с разным диаметром, тем самым имитируя гидравлическую сортировку наносов.

2. Описание системы моделирования перемещения поллютантов р. Туул, Орхон и Селенга в программе HEC-RAS

2.1 Подготовка геометрических данных

Подготовка расчетной модели включает два основных этапа: работа в программном комплексе HEC-GeoRAS (подготовка геометрических данных) и работа в основной программе HEC-RAS.

К основным геометрическим данным относятся:

- схемы русловой сети;
- данные о размерах и форме поперечного сечения потоков;
- длины участков;
- коэффициенты сопротивления (для расчета потерь энергии на преодоление сил трения и потерь при сжатии или расширении потока)
- информация о слиянии (разделении) потоков.

Подготовка входных геометрических данных производится в программном комплексе ArcGIS при помощи встроенной в него функции HEC-GeoRAS.

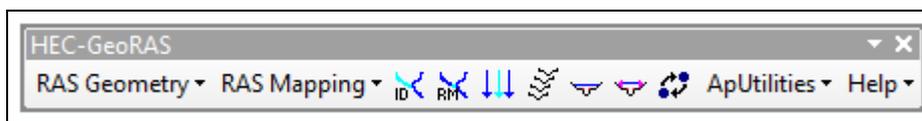


Рисунок 2.1 Интерфейс программы HEC-GeoRAS

Для создания файла с геометрической информацией, в последствие используемого в программном комплексе HEC-RAS, необходимо последовательно создать и наполнить информацией различные слои (RAS layers). Встроенная функция позволяет автоматически создавать эти файлы с разрешением .shp с определенными атрибутами внутри них. Процесс заполнения атрибутивной таблицы заключается в считывании программой необходимых ей данных с ЦМР (цифровой модели рельефа).

Наиболее важными файлами являются: центральная линия (stream centerline), береговые линии (bank lines), точки уреза (bank points), линии направления течения (flow path centerlines), поперечные профили (xs cut lines), информация о шероховатости русла (landuse areas).

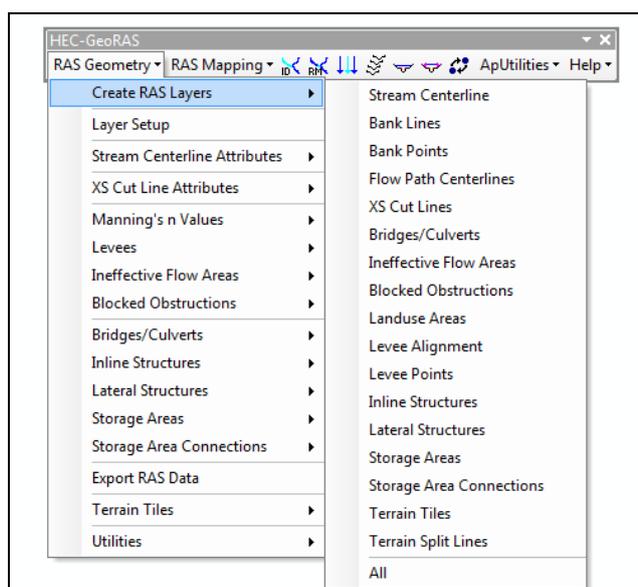


Рисунок 2.2 Создание слоев в программе HEC-GeoRAS

Первый шаг подготовки входной геометрии заключается в создании центральной линии, она необходима для идентификации речной сети. Центральная линия, как и большинство подготавливаемых файлов, проводится в обязательном порядке от верхней границы моделируемого участка к нижней (по течению). Затем дается название реки и название участка (функция ID), это особенно необходимо для приточного модельного участка, когда на месте впадения притока участок реки делится на отдельные её части. Следующий шаг – получение из центральной линии 3D линию, т.е. продольный профиль

моделируемого участка реки, для этого используется функция «Stream centerline attributes».

Затем по тому же принципу, как и в случае центральной линии, проводятся береговые линии. Точки, обозначающие урезы русла, считываются автоматически на месте пересечения поперечных профилей и береговых линий.

Линии направления течения необходимы для расчётов прохождения высоких расходов воды при выходе потока на пойму. Эти линии проводятся также сверху вниз по течению, причем сначала необходимо провести левую, а затем правую линию.

Следующий шаг подготовки файла входной геометрии заключается в создании поперечных профилей. Именно поперечные профили являются ключевыми входными данными для программного комплекса HEC-RAS. Создаваемые поперечные профили должны полным образом отражать плановое очертание русла, а также все особенности рельефа поймы (ложбины, гривы и т.д.). Необходимо, чтобы поперечники захватывали всю пойму и в обязательном порядке должны проходить перпендикулярно к руслу реки, проводятся поперечные профили слева на право (смотря по течению). Поперечные сечения необходимо задавать на тех участках потока, где встречаются изменения расходов воды, уклонов, формы поперечного сечения русла или шероховатости, в местах начала или конца дамб, мостов, плотин и т.д. независимо от расстояний между сечениями. Расстояние между поперечными сечениями также является функцией длины потока, уклона и однородности формы поперечного сечения. Большие однородные реки с малыми уклонами обычно требуют наименьшего количества числа поперечных сечений на километр.

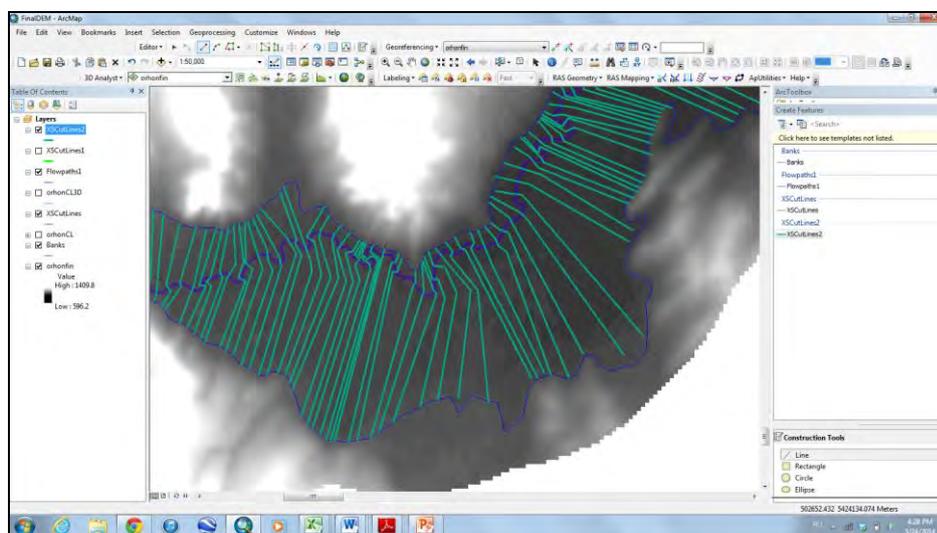


Рисунок 2.3 Создание поперечных профилей

Программный комплекс HEC-GeoRAS позволяет автоматически строить поперечные профили одной ширины через равное расстояние. Однако, применение этой функции возможно лишь для небольших прямолинейных модельных участков рек, с поймой одной ширины.

После создания поперечников, как и в случаи с другими файлами, их необходимо наполнить информацией. Каждому поперечнику дается номер, соответствующий расстоянию от нижней (по течению) границы участка, также считывается информация о точках урезов русла реки. Главным шагом подготовки поперечников является наполнение их информацией об абсолютных высотах. После этого шага мы имеем 3D профили, которые готовы к экспорту в HEC-RAS.

Последний необходимый шаг подготовки входных файлов – ввод информации о шероховатости русла и поймы. Для этого создаются полигины, их может быть любое количество, для каждого полигона задается своё значение коэффициента шероховатости.

Кроме того возможно добавление файлов с информацией о мостах, дамбах, возможно задание границ «мертвых» зон. Однако эта информация является дополнительной, но не обязательной.

После подготовки всех необходимых файлов файл с входной геометрией можно экспортировать в HEC-RAS (функция Export RAS Data).

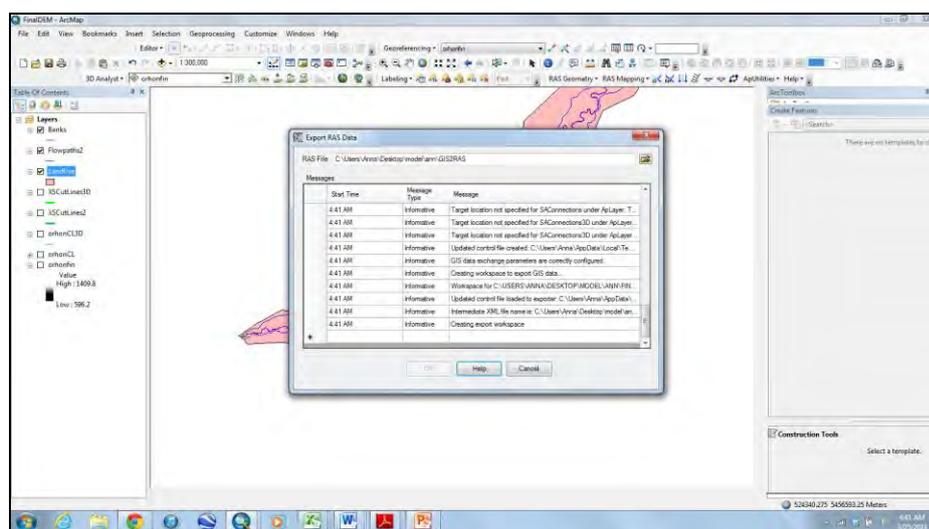


Рисунок 2.4 Окно экспорта данных в HEC-RAS

2.2 Основной этап создания модели

Для создания гидравлической модели и выполнения расчётов в программном комплексе HEC-RAS работа ведется в проектах. Проект представляет собой совокупность файлов на основе которых ведутся расчёты.

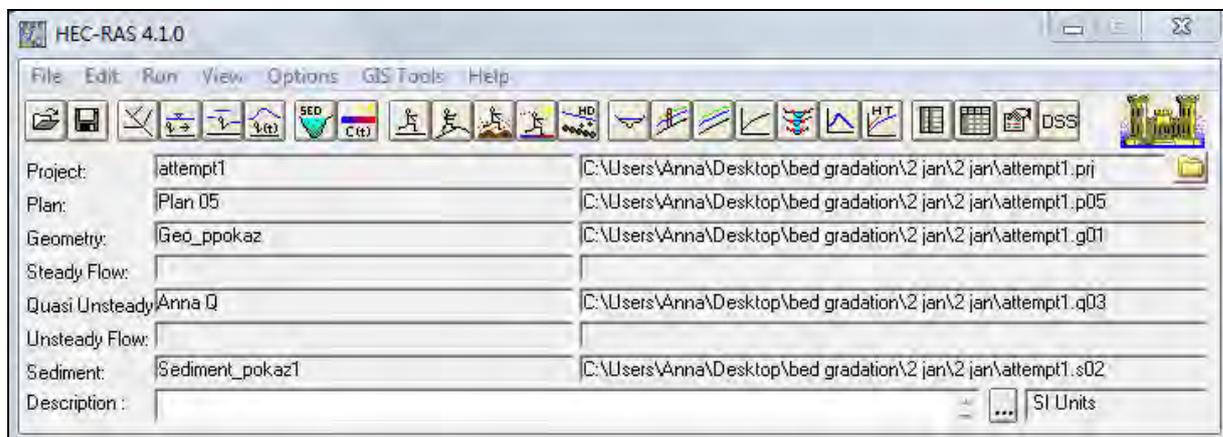


Рисунок 2.5 Интерфейс программы HEC-RAS

При запуске программы пользователь может открыть проект или создать новый (выпадающее меню «File»).

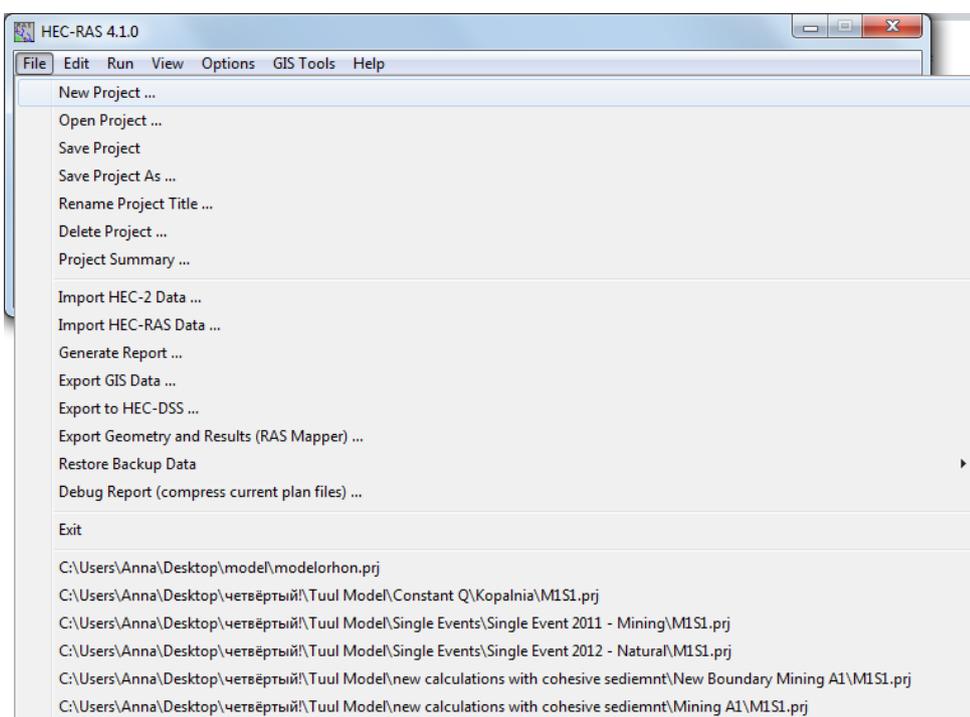


Рисунок 2.6 Окно работы с проектом (создание, открытие, сохранение и т.д.)

Проект включает в себя:

-файлы с разрешением .P01-.P99. Это планы, создающиеся автоматически при запуске расчётов;

-файлы запуска .R01-.R99. Они соотносятся с плановыми файлами, то есть файлу .P01 соответствует .R01. Файлы запуска также создаются автоматически при запуске расчётов.

-выходные файлы .O01-.O99, создаются автоматически после окончания расчётов

-файл геометрических данных .G01-.G99. Файл можно открыть, создать или экспортировать в окне Geometric Data

Для просмотра или добавления геометрических данных пользователь может нажать на третий в строке значок с изображением речной сети. Здесь же может происходить редактирование, как в целом параметров геометрических данных, так и в отдельности каждого поперечного профиля. Также здесь можно добавить дополнительные изображения (карты, снимки) для удобства работы пользователей.

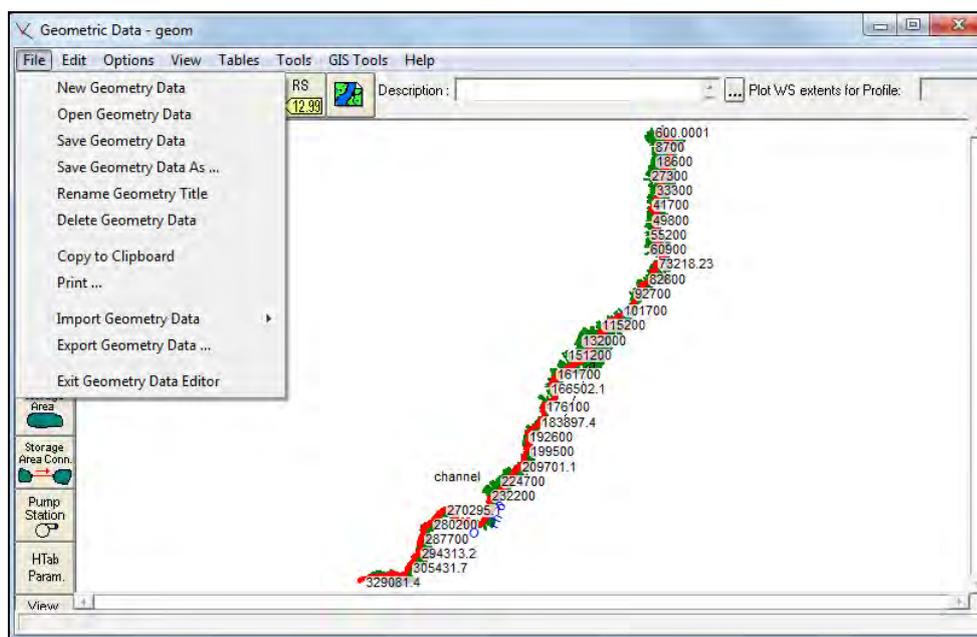


Рисунок 2.7 Геометрические данные

- файлы с гидрологическими данными для установившегося режима потока .F01-.F99, для неустановившегося .U01-.U99 и для квази-установившегося потока (.Q01-.Q99). Создаются в соответствующих окнах. Для работы с модулем транспорта наносов используется блок расчёта квази-установившегося движения воды. Для просмотра этих

данных можно нажать на значки с четвертого по шестой. Там задаются начальные и граничные условия для гидрологических данных.

-файлы с данными о наносах .S01-.S99. Они включают в себя данные о стоке воды, граничные условия и непосредственно характеристики наносов. Для их просмотра необходимо начать седьмой значок с изображением русла с наносами.

- файлы с характеристиками качества воды (.w01-.w99), как и предыдущие файлы, вводятся только при использовании соответствующих модулей. Следующий после данных о наносах значок.

После задания всех параметров и сохранении файлов в одном проекте, он сохраняется и при последующих запусках необходимо лишь открыть, как указано выше, проект.

После открытия проекта можно менять заданные параметры и характеристики, их сохранение происходит автоматически, перед закрытием проекта его необходимо сохранять.

Для запуска расчётов, в зависимости от используемого модуля, пользователь нажимает один из указанных ниже значков. Или же выполнить это через всплывающее окно "Run". Для модуля транспорта наносов используется третий значок.

Для просмотра результатов пользователь вызывает всплывающее меню "View". Для расчётов транспорта наносов пользователь имеет возможность посмотреть результаты распределения характеристик по времени и по пространству (sediment spatial plot, sediment time series plot)

Основные результаты расчета транспорта наносов включают:

- 1) общий расход наносов (в том числе с разделением по фракциям крупности), проходящий через каждое поперечное сечение, и
- 2) объем отложения (или размыва) наносов к каждому поперечному сечению, начиная с верхнего створа, с которого ведется моделирование.

3. Структура веб-страницы Байкальского информационного центра (БИЦ)

Главная страница (раздел «Моделирование транспорта наносов»).

Содержание страницы (ссылки на подразделы):

- общая информация
- принцип работы
- входные данные
- результаты моделирования

Далее для каждого подраздела содержание страницы.

Общая информация.

Содержание страницы:

Программный комплекс HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) разработана в Гидрологическом инженерном центре Корпуса гражданских инженеров армии США (U.S. Army Corps of Engineers, 1995). Система выполняет одномерные гидравлические расчеты профилей водной поверхности для установившегося и неустановившегося движения воды, а также расчет режима наносов и расчет качества воды.

Последняя версия программы (HEC-RAS 4.1.0) включает четыре расчётных модуля:

- 1) расчёт профилей водной поверхности для установившегося движения воды;
- 2) расчёт неустановившегося движения воды;
- 3) моделирование транспорта наносов в деформируемых руслах ;
- 4) анализ качества воды.

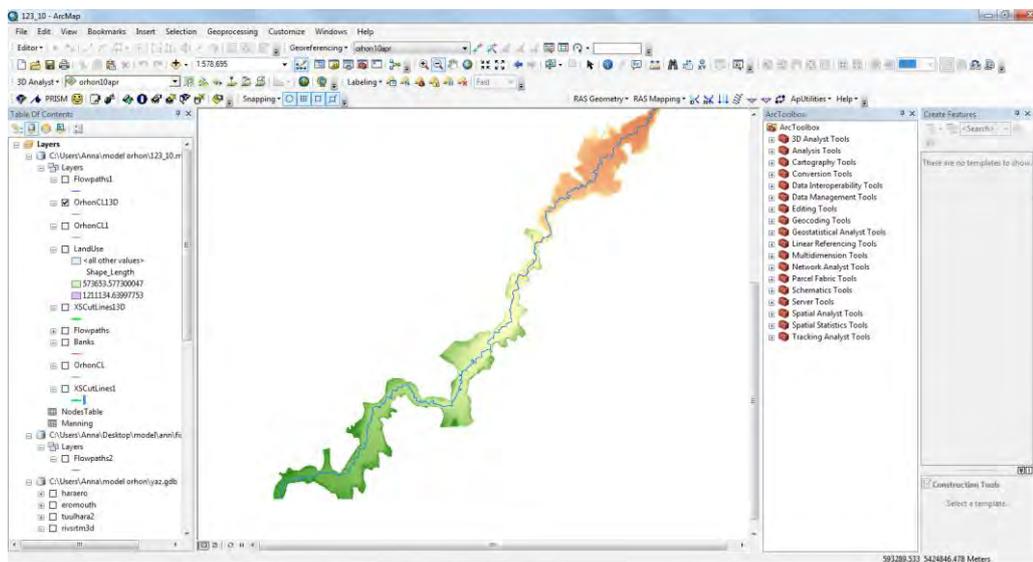
Принцип работы.

ссылка на файл pdf «Описание работы в программном комплексе HEC-RAS»

Входные данные.

Содержание страницы:

В качестве исходных данных были использованы: ЦМР (цифровая модель рельефа), данные промеров русла, гидрологическая информация с гидрометрических станций, данные о составе наносов.



Цифровая модель рельефа на исследуемый участок Орхона

В качестве входных гидрологических данных задавались граничные условия для квази-неустановившегося движения воды. Для верхнего створа в качестве граничного условия для р. Орхон были использованы суточные расходы воды с поста в городе Сухэ-Батор.

Для нижних створов был выбран тип граничных условий – нормальная глубина, при использовании этой опции вводится уклон трения. Отметки глубин для каждой серии расходов считаются методом приближения, с помощью уравнения Шези в форме Маннинга.

Информация о наносах включала: гранулометрический состав и граничные условия, задаваемые в виде зависимости $R=f(Q)$.

Результаты моделирования.

Данная страница включает примеры выходных данных модели в виде графиков и комментариев. Варианты визуализации результатов представлены в виде pdf файлов, на которые даны ссылки на сайте БИЦ (приложение 1 в настоящему отчету).

4. Отчет об установке и внедрении модельного комплекса HEC-RAS в странах

4.1 Презентация и внедрение модельного комплекса HEC-RAS в г. Улан-Удэ

Дата проведения: 6 августа 2014 года

Место проведения:

Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН

Участники:

Заведующий лабораторией геоинформационных систем, доктор географических наук -
Бешенцев Андрей Николаевич и другие сотрудники института

Программа:

Вступительная часть презентации представляла собой знакомство с программным комплексом HEC-RAS. Была дана общая информация о разработчиках и основных принципах работы модели.

Вторая часть презентации включала описание и этапы подготовки входной информации: подготовки файла геометрических и гидрологических данных.

В третьей части представления модели были показаны основные результаты моделирования транспорта наносов в нижнем течении рек Туул и Орхон.

Заключительная часть включала установку программного комплекса на компьютер БИП СО РАН. На практике были показаны основные этапы загрузки файлов в программу, а также основные, наиболее важные этапы работы в программном комплексе: ввод и изменение параметров, редактирование входных данных, просмотр и извлечение результатов.

Обсуждаемые темы:

Возможности применения, визуализация результатов, возможности изменения входных параметров

4.2 Презентация и внедрение модельного комплекса HEC-RAS в г. Улан-Батор

Дата проведения: 15 августа 2014 года

Место проведения: Национальный Водный комитет Монголии

Участники: технический директор проекта комплексного управления природными ресурсами трансграничной экосистемы бассейна Байкала - Тумурчудур Содном, представители Национального водного комитета, Гидрометеорологической службы Монголии и др.

Программа:

Первая часть презентации: общая информация о модельном комплексе, информация о принципах работы, методах расчетов.

Вторая часть: была описана подготовка входной информации, дана характеристика геометрических и гидрологических данных, этапы подготовки входной геометрии (создание ЦМР, наполнение информацией поперечных профилей).

Третья часть: описание результатов моделирования участков рек Туул и Орхон, в процессе внедрения модельного комплекса были показаны возможные виды представления результатов моделирования и их визуализации.

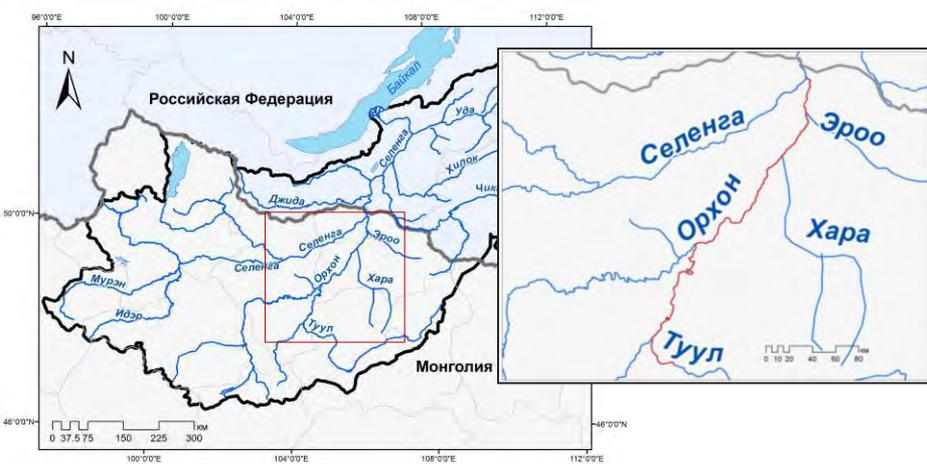
Четвертая часть: обучение основам работы в программном комплексе: открытие проекта, ввод и изменение параметров, просмотр и редактирование входных данных, просмотр и извлечение результатов, варианты экспорта данных.

Обсуждаемые темы:

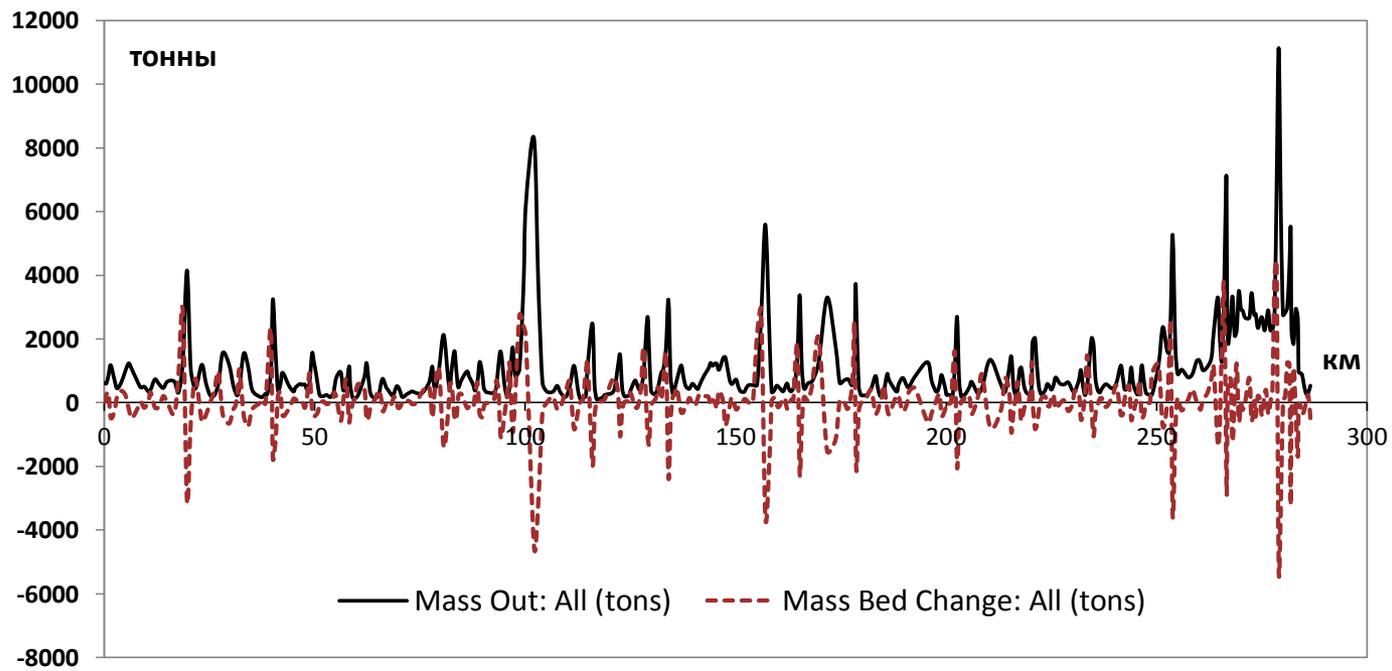
Входные гидрологические данные, возможности применения, визуализация результатов

Результаты семинара:

Принято решение о необходимости проведения повторного семинара-обучения, с возможностью работы каждого участника на собственном компьютерном устройстве и выполнения заранее подготовленных обучающих заданий.

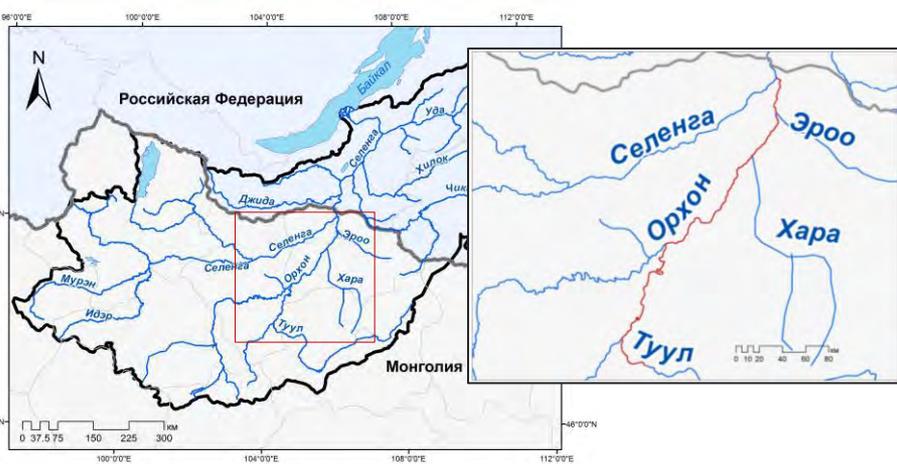


Результаты моделирования нижнего течения р. Орхон в программе HEC-RAS

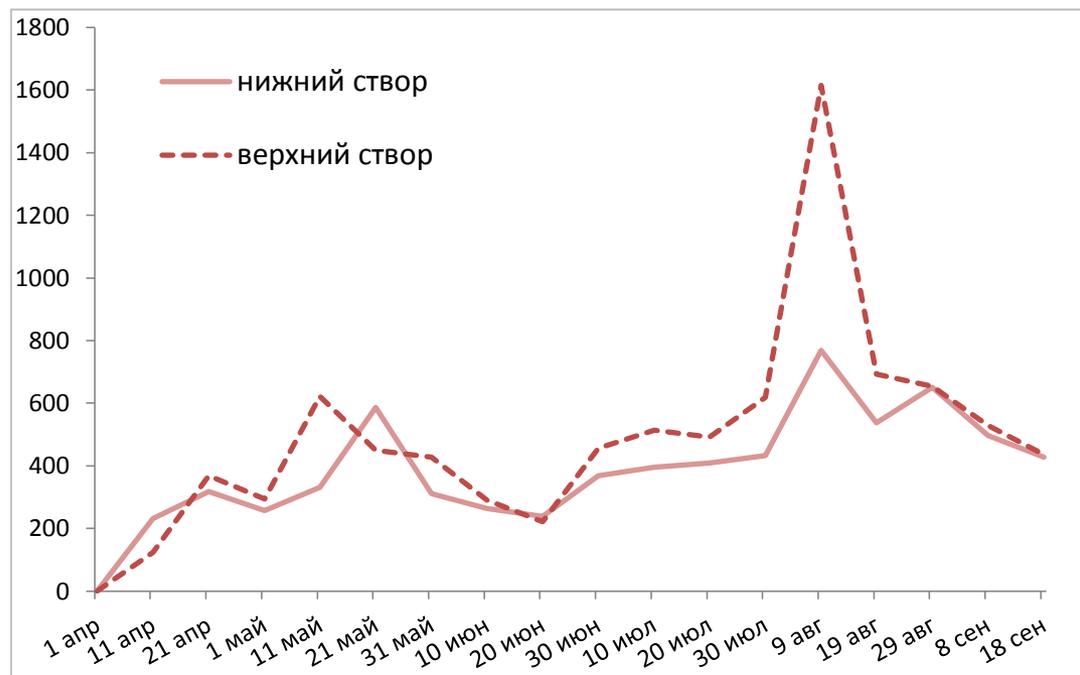


На модельном
участке р. Орхон
преобладает
аккумуляция наносов,
наибольшая её
интенсивность в
нижнем течении,
максимальная эрозия
в верхнем

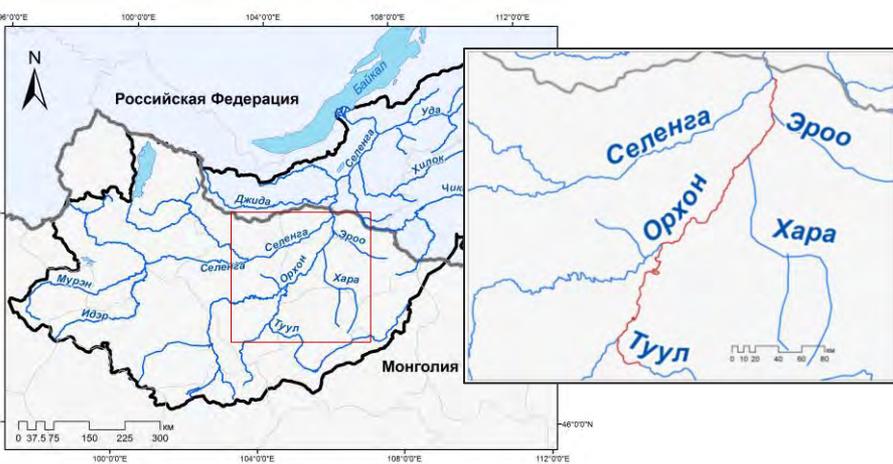
Изменение стока наносов и деформаций дна по длине участка



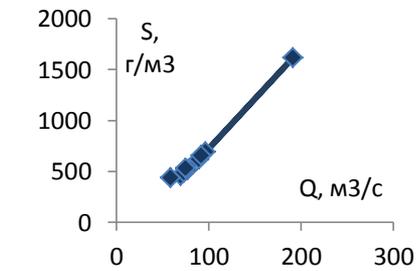
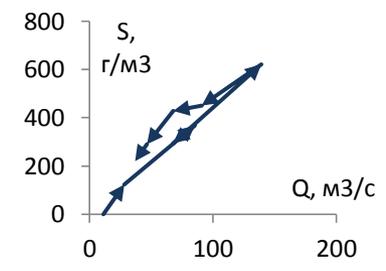
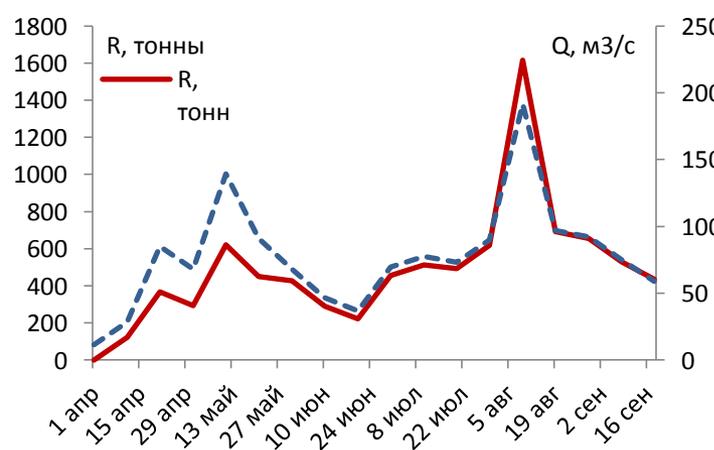
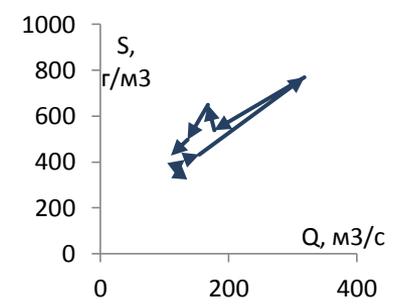
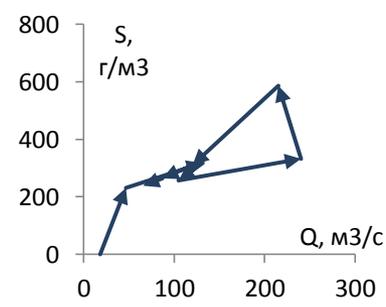
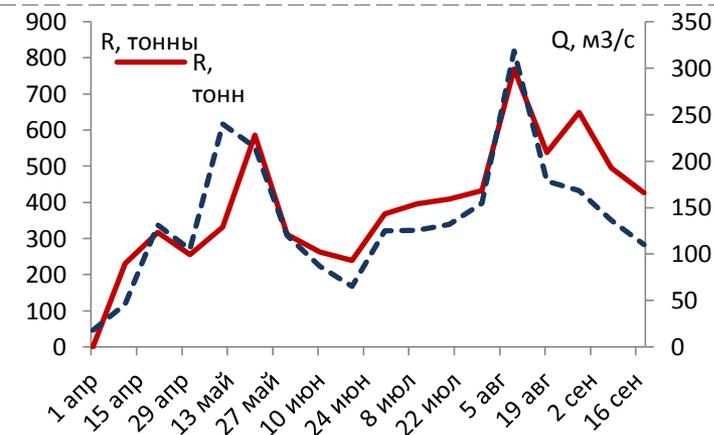
Результаты моделирования нижнего течения р. Орхон в программе HEC-RAS



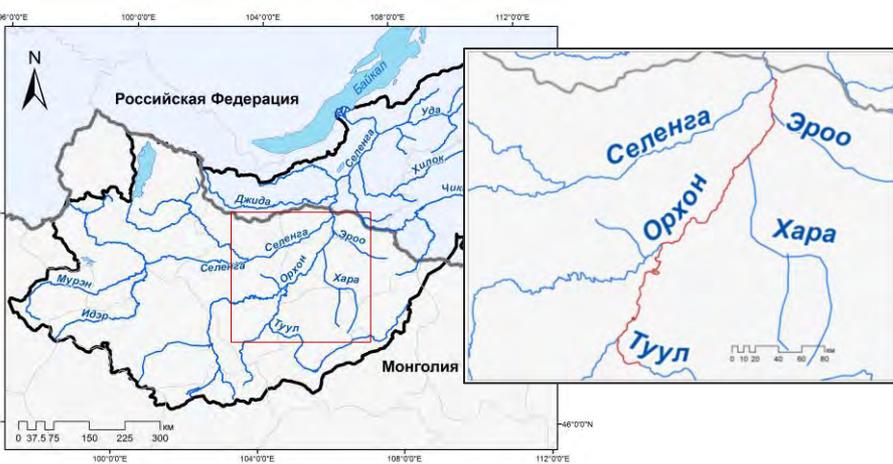
На графике представлен ход стока наносов на верхнем и нижнем модельном створе. Первый пик, приходящийся на май (половодье) значительно растянут по сравнению с паводком в августе. Наступление максимальных значений стока наносов на верхнем и нижнем створе происходит с разницей в 10 дней, когда как пики паводка совпадают.



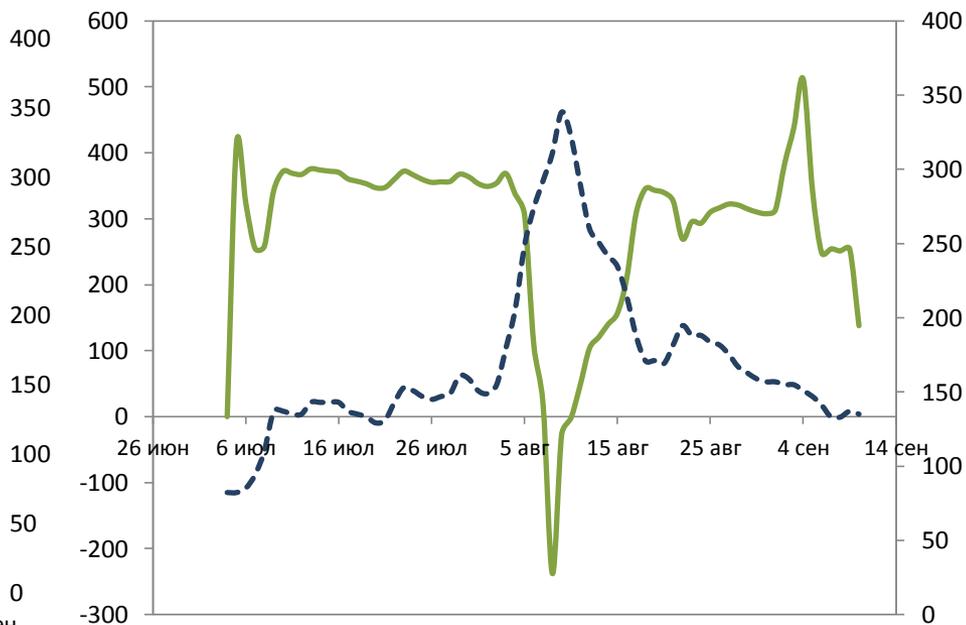
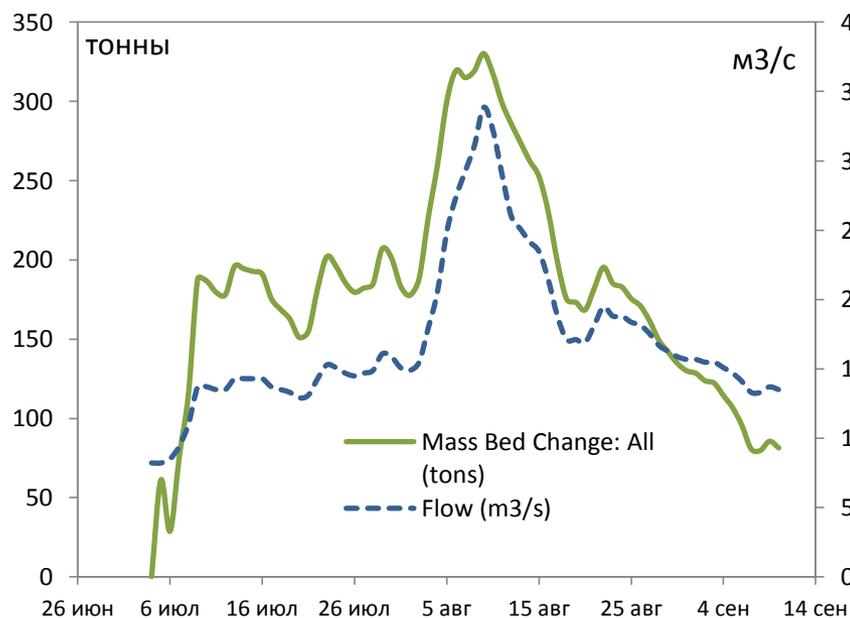
Результаты моделирования нижнего течения р. Орхон в программе HEC-RAS



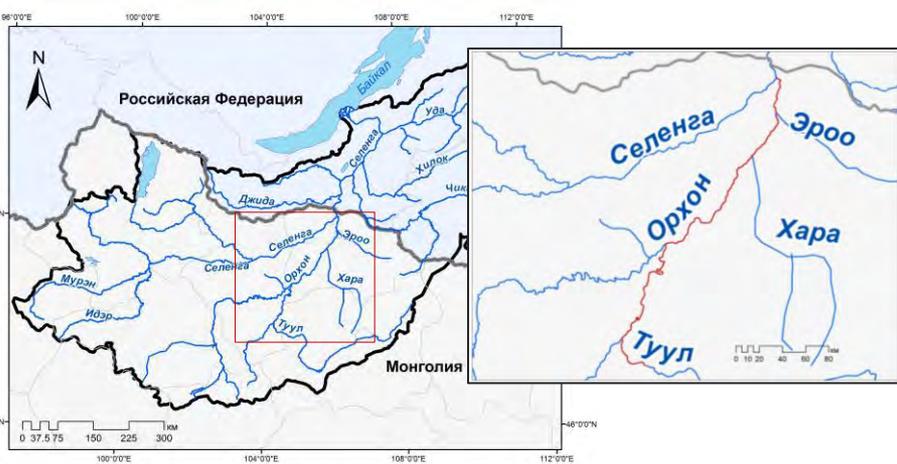
Изменение вида связи мутности и расходов воды для верхнего и нижнего створов. Отрицательная гистерезисная петля для нижнего створа (запаздывание наступления максимума расходов воды). Для остальных пиков практически прямая связь.



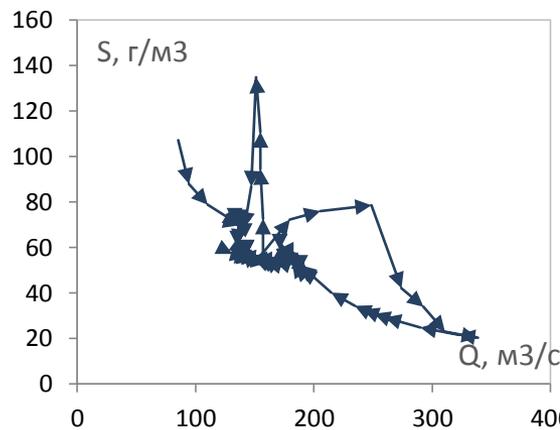
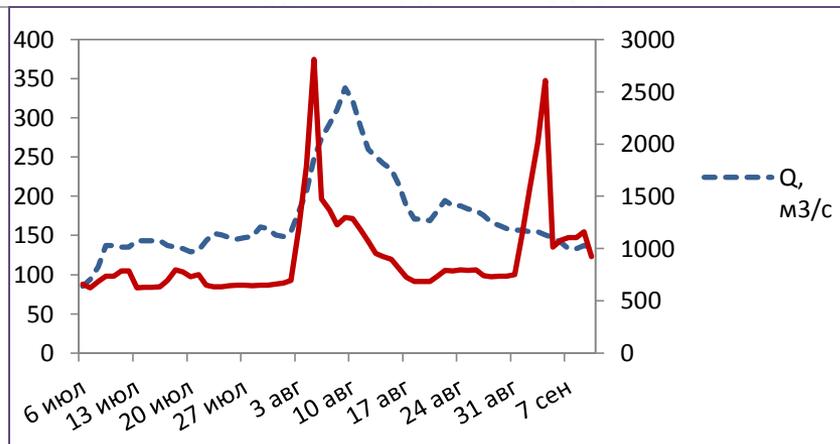
Результаты моделирования нижнего течения р. Орхон в программе HEC-RAS



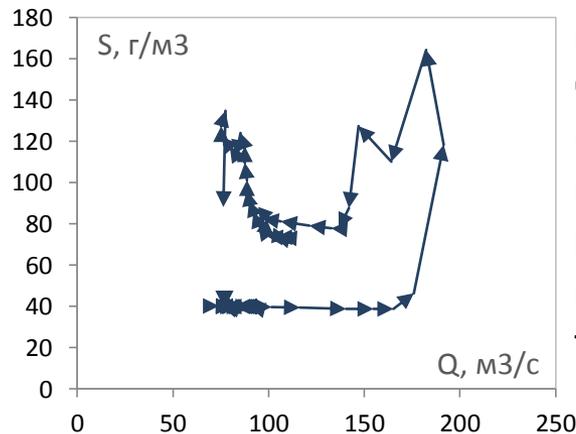
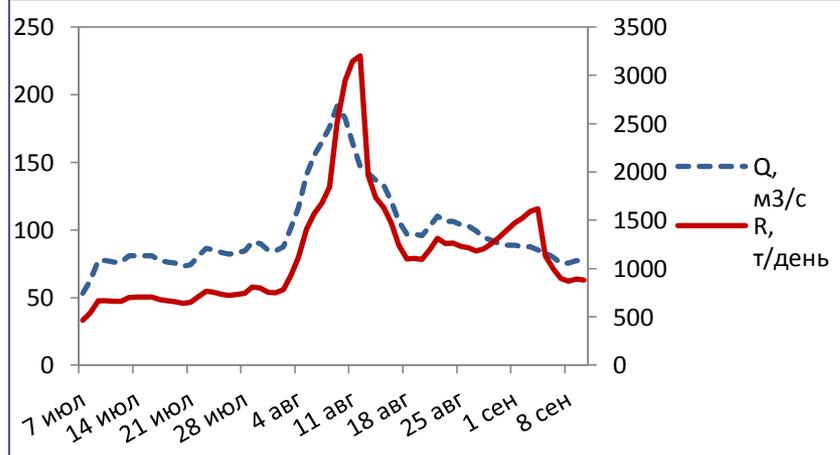
Изменение интенсивности деформаций. Для большинства створов достаточно четко прослеживается увеличение интенсивности деформаций при прохождении максимума расходов воды, однако для некоторых створов направленность остается неизменной, а для части происходит смена аккумуляции и эрозии



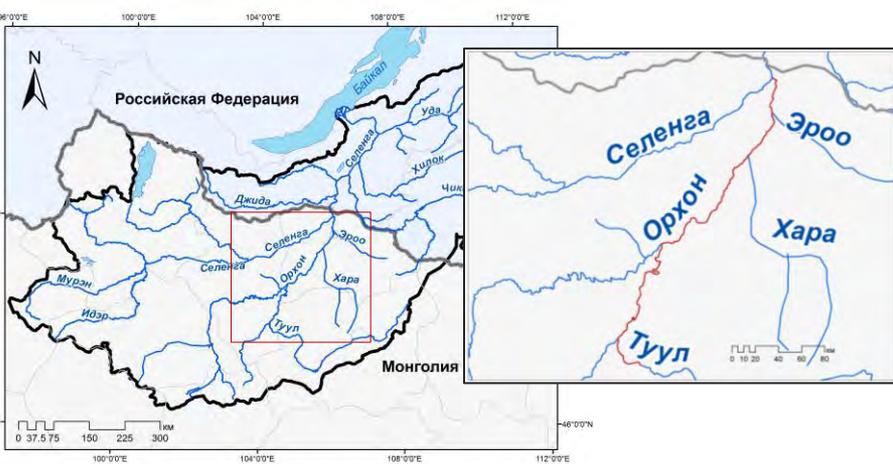
Результаты моделирования нижнего течения р. Орхон в программе HEC-RAS



Для верхней части
модельного участка
характерно
опережение
максимума стока
наносов, на нижнем
участке: графики связи
образуют
отрицательные
гистерезисные кривые,
что может быть
объяснено более
поздним поступлением
продуктов эрозии на
нижние участки
течения реки



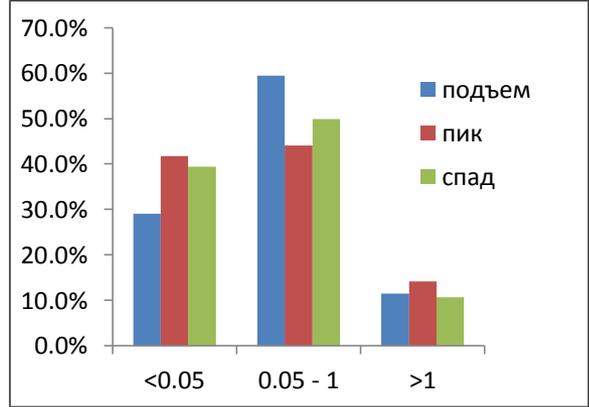
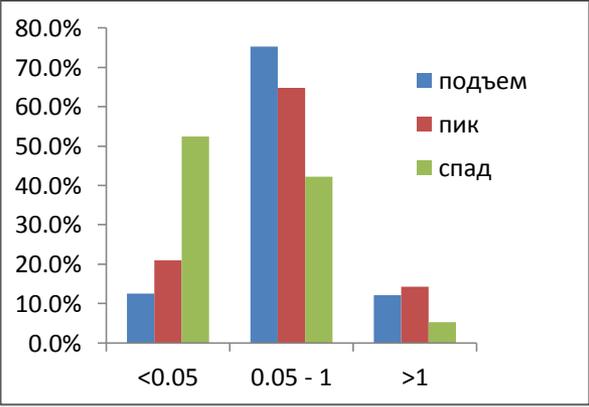
Изменение вида графиков связи расхода воды и наносов по длине модельного участка



Результаты моделирования нижнего течения р. Орхон в программе HEC-RAS

Процентное соотношение наносов различной крупности для верхнего и нижнего створа модельного участка

створ	фаза	0.001-0.005	0.005-0.01	0.01-0.05	0.05-0.1	0.1-0.25	0.25-0.5	0.5-1	1-3	3-5
входной	подъем	2.2	2.3	8.1	1.2	23.6	33.7	16.7	12.1	0
	пик	4	4	13	2	20	28	15	14	0
	спад	1	1	51	10	10	14	7	5	0
выходной	подъем	0.4	0.0	28.6	6.3	16.6	24.1	12.4	11.5	0
	пик	1	0	41	4	12	18	10	13	1.3
	спад	0	0	39	5	14	20	11	11	0



Процентное соотношение наносов разной фракции для верхнего (левая) и нижнего (правая) створов