

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»)

Этап. 1.

1. Description of expert-analytical system of chemical element transfer down the Selenga river

2. Report on water balance of the Selenga River Basin



Утверждаю

Заместитель декана по научной работе  
географического факультета МГУ

Член-корр. РАН

С.А. Добролюбов

Ответственный исполнитель

К.Г.Н



С.Р. Чалов

МОСКВА 2013

## 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 \_\_\_\_\_ Промахова Е.В.  
подпись, дата

## Оглавление

<b>Оглавление .....</b>	<b>3</b>
<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Используемые программные средства и подходы .....</b>	<b>5</b>
1.1 Концепция моделирования водного баланса и миграции загрязнителей в бассейне р. Селенга .....	5
1.2 Описание программного комплекса HEC-RAS для р. Туул и р. Орхон .....	7
1.3 Описание экспертно-аналитической системы .....	15
<b>1.4. Описание региональной модели водного баланса р. Селенга (ECOMAG, Weap, New LocClim) .....</b>	<b>26</b>
1.4.1. Модель формирования стока. Структура гидрологической модели ECOMAG .....	26
1.4.2. Экспертно-аналитические модели региональной оценки водных ресурсов: WEAP .....	37
1.4.3. Гидроклиматические модели: New LocClim .....	38
<b>2. Промежуточные результаты выполненных оценок водного баланса и миграции загрязнителей .....</b>	<b>41</b>
2.1 Современные оценки водного баланса рек бассейна Селенги .....	41
2.2 Современные оценки транспорта загрязнителей реками бассейна Селенги .....	48
<b>Заключение.....</b>	<b>55</b>
<b>Литература .....</b>	<b>57</b>

## Введение

Данный отчет подготовлен в качестве промежуточного по проекту “Setting up the model of pollutants transport and water balance calculation in the Baikal basin”), реализуемого в рамках программы ПРООН-ГЭФ «Комплексное управление водными ресурсами трансграничной экосистемы бассейна Байкала». Конечной целью проекта является разработка системы моделирования перемещения загрязнителей в бассейне Селенги (на основе одномерного комплекса HEC-RAS и экспертно-аналитической системы).

На данном этапе выполнена подготовка структуры 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; разработана экспертно-аналитическая системы переноса химических элементов, которая может быть реализована в любом пространственном масштаба в пределах бассейна. В отчете приведены также оценки водного баланса бассейна р. Селенга, и подготовлен анализ программных средств, используемых для региональных оценок водного баланса.

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. Используемые программные средства и подходы

### 1.1 Концепция моделирования водного баланса и миграции загрязнителей в бассейне р. Селенга

В настоящем разделе рассмотрены различные программные средства, которые могут быть использованы для фактической и перспективной оценки водного баланса и качества речных вод бассейна Селенги в современных и ожидаемых природно-техногенных условиях. Реализация различных подходов к моделированию может быть осуществлена на разном пространственном уровне (рис. 1.1). В зависимости от объема требуемой исходной информации и задач внедрения тех или иных программных средств может быть выделено 3 пространственных масштаба:

1. Бассейновый. Соответствует задаче внедрения экспертно-аналитической системы оценки дальности переноса загрязнителей и региональным гидроклиматическим и физико-географическим моделям водного баланса.

2. Подбассейновый. Может использоваться при оценке последствий реализации водохозяйственных мероприятий в бассейне и рекомендуется к использования для наиболее заселенной части бассейна, где могут быть расположены проектируемые объекты инфраструктуры.

3. Русловой. Рекомендуется для реализации гидродинамического моделирования для детальной оценки процессов массопереноса по длине рек Туул-Орхон от крупнейших промышленных центров Монголии (Заамар).

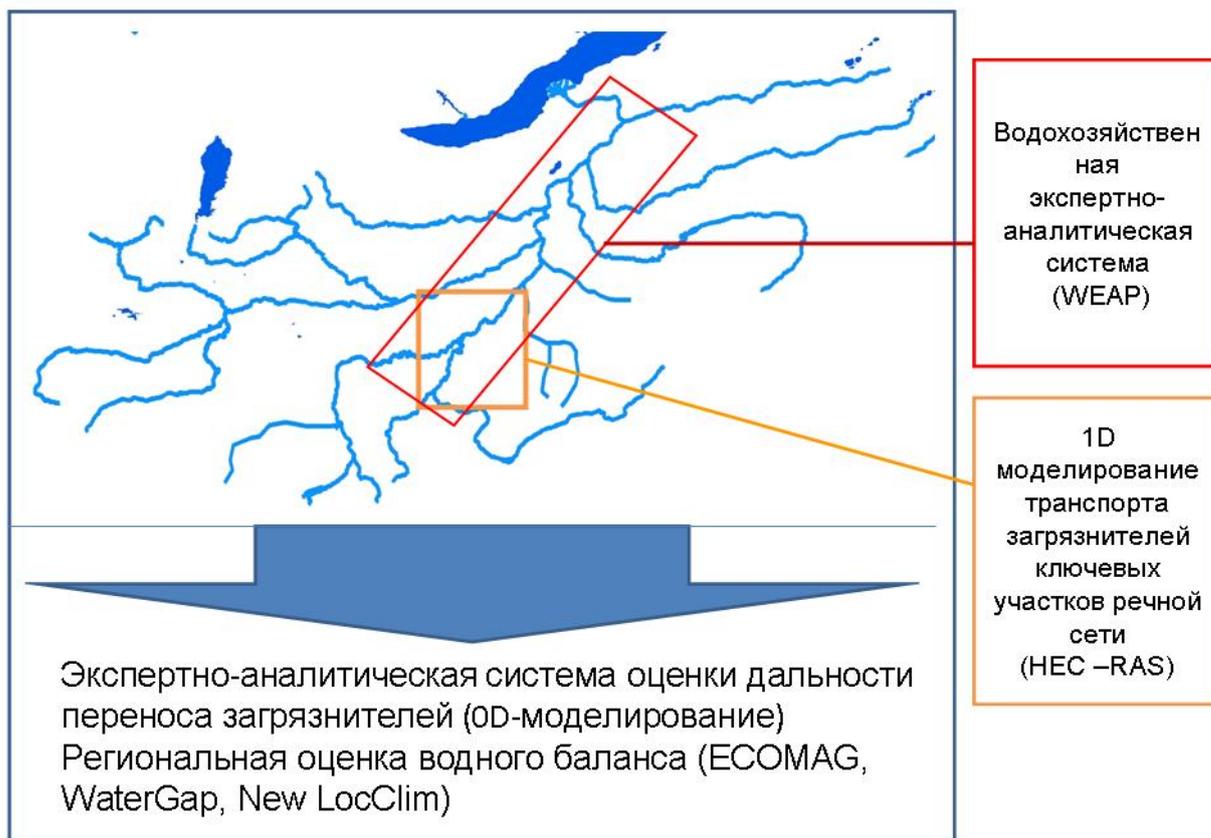


Рис. 1.1.1. Концептуальная схема моделирования водного баланса и миграции загрязнителей в бассейне р. Селенга.

## 1.2 Описание программного комплекса HEC-RAS для р. Туул и р. Орхон

Для моделирования переноса загрязняющих веществ по длине речных систем Туул и Орхон используется программа HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), разработанная в Гидрологическом инженерном центре Корпуса гражданских инженеров армии США (U.S. Army Corps of Engineers, 1995). Программа реализует одномерный подход к гидравлическому моделированию речных потоков, работает в среде Windows и включает в себя графический интерфейс (рис. 1.2.1), компоненты гидравлического анализа, хранение и управление данными, графические и отчётные средства.

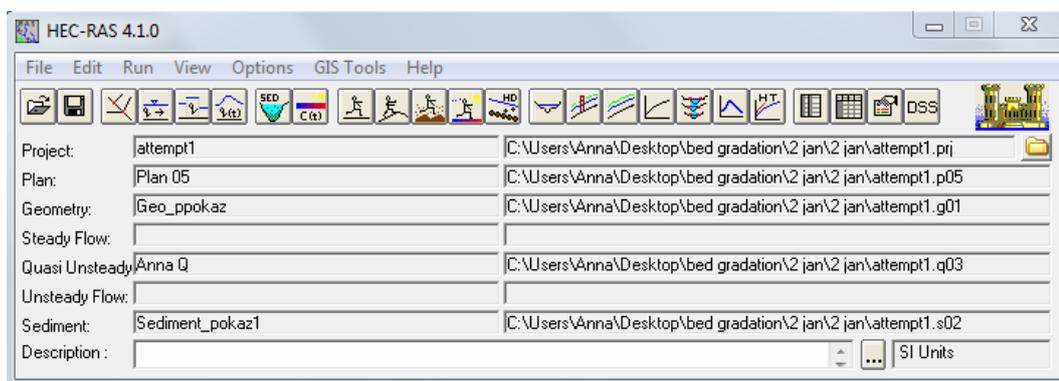


Рисунок 1.2.1 Интерфейс программы HEC-RAS

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.1.2.2).

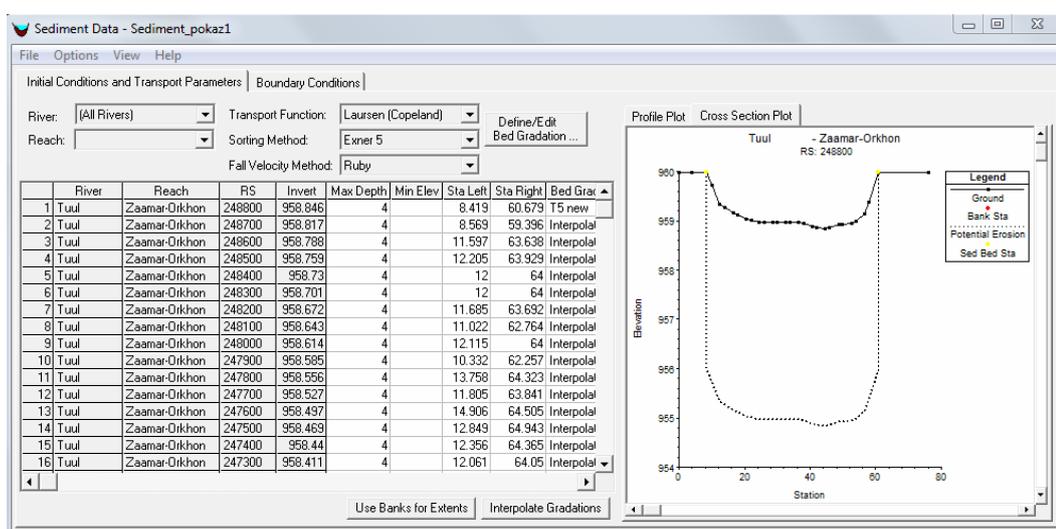


Рисунок 1.2.2 Окно ввода параметров наносов

Структура русловых отложений задаётся в зависимости от наличия отмытки (рис. 1.2.3). При наличии аллювиальной отмытки 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).

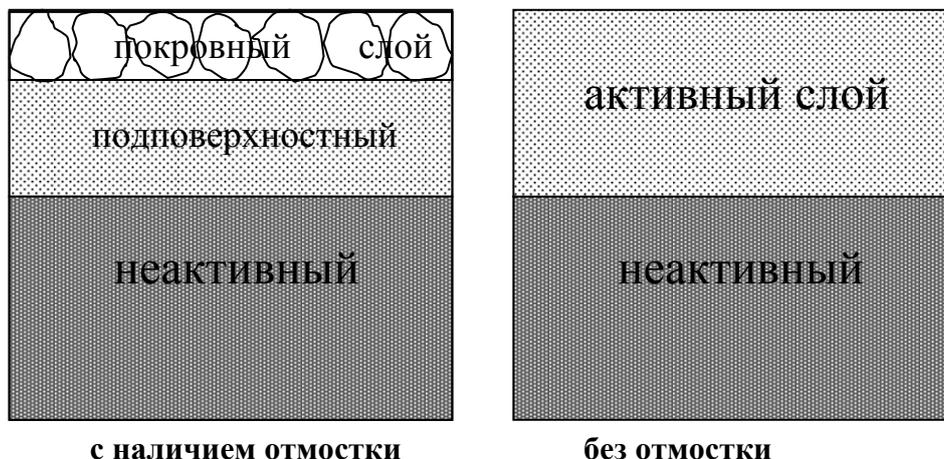


Рисунок 1.2.3 Методы сортировки наносов (USACE..., 2010)

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 осаднения 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 осаднения 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,  $\beta_j$  - 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. 1.2.4).

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).

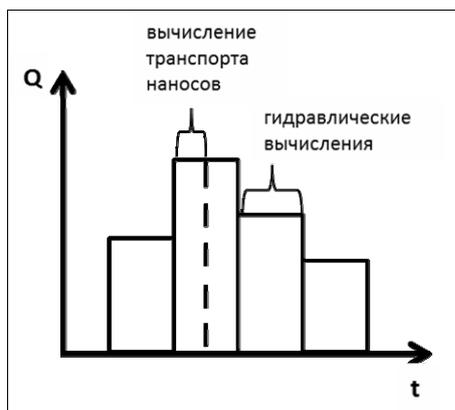


Рисунок 1.2.4 Периоды вычисления гидравлических параметров и транспорта наносов

Расчёт транспорта наносов можно представить схематически в следующем виде (рис.1.2.5).

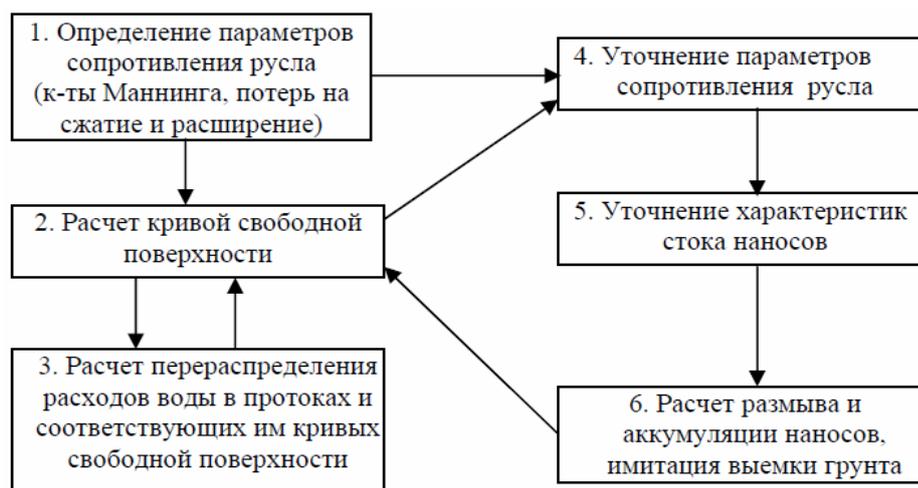


Рисунок 1.2.5 Схема вычисления транспорта наносов в программе HEC-RAS

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.

### Описание модельных участков на р. Туул и р. Орхон

В качестве модельных участков использовано нижнее течение р. Туул длиной 246 км и нижнее течение р. Орхон протяжённостью 347 км. Начало участка на Тууле располагается в 82 км выше крупного месторождения золота Заамара, в 160 км ниже г. Улан-Батора. И кончается местом впадения Туула в Орхон. Для р. Орхон модельный участок начинается от впадения в него р. Туул до устья, образованного при впадении в р. Селенга вблизи российско-монгольской границы (рис. 1.2.6).

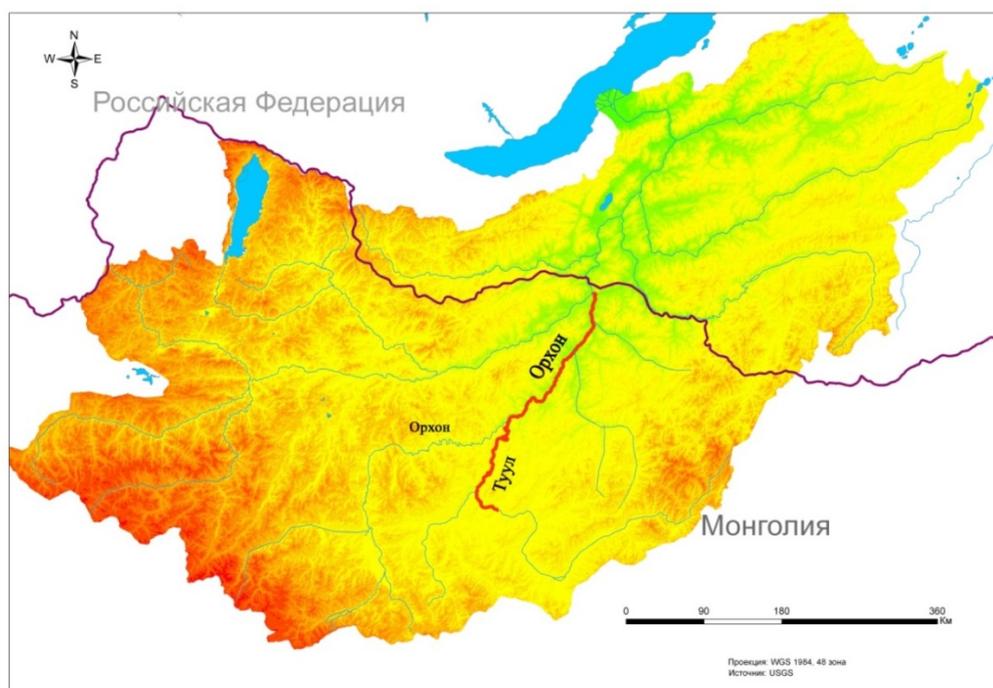


Рисунок 1.2.6 Модельный участок р. Туул и р. Орхон в бассейне р. Селенга

Среднегодовой расход воды в р. Туул в нижнем течении составляет  $20 \text{ м}^3/\text{с}$ , в р. Орхон (г.Сухэ-Батор) –  $122 \text{ м}^3/\text{с}$  (Гидрологический режим..., 1977). Орхон является основным притоком Селенги, однако существенно уступает ей по водности. В пределах модельного участка в реку впадают крупные притоки Туул, Хара и Ероо. Долина реки в нижнем течении преимущественно широкая, корытообразная. Степи являются основным типом ландшафтов в бассейне Орхона, за исключением участков на севере, где появляются лесные массивы (кустарники и сосны на песчаных почвах). Рельеф преимущественно холмисто-сопочный. Ширина поймы достигает 6 км, преимущественно луговая, местами заболоченная, затапливается почти ежегодно. Русло извилистое, характеризуется сложным разветвлением на протоки (более 2-3 рукавов). Ширина пояса руслоформирования на разветвлённых участках достигает 4 км. Ширина самого русла изменяется от 50 до 250 м, ширина русловых проток составляет 5-40 м.

Средние уклоны на участке от Туула до Хары составляют 0,00076 и увеличиваются на некоторых участках до 0,00011-0,0018; между впадением Хары и Ероо средний уклон уменьшается до 0,00045 (с максимумами 0,0003-0,0008); на участке от Ероо до впадения в Селенгу уклон минимален – 0,0004 (до 0,00015-0,0014). Средняя глубина на перекатах составляет 0,4-0,7 м, на плёсах 3-3,5 м. Скорости течения варьируются от 0,8 до 2,5 м/с. Дно галечное, песчано-галечное, местами песчаное, в некоторых местах каменисто, встречаются валуны и крупные обломки скал. Берега неустойчивые, их высота 1-2 м, на участках, где отсутствует пойма, их высота достигает 17-18 м. Усиленная боковая эрозия приводит к повышенной мутности воды и в межпаводочный период (Кузнецов, 1959).

В пределах исследуемого участка Туул течет преимущественно в узкой долине, шириной 0,2-0,5 км. На смену гальке, слагавшей берега и дно реки в верховьях, приходят пески и песчано-илистые легкоразмываемые отложения. Здесь преобладают степные ландшафты (Кузнецов, 1955). На участке нижнего течения р. Туул средний уклон составляет 0,0006, а скорости течения падают до 1 м/с. Число разветвлений в русле реки сокращается, оно более прямолинейное в начале участка и имеет плавные излучины в конце. Глубина на перекатах в нижнем течении увеличивается и, как правило, превышает 0,7 м. Высота берегов обычно 1-1,5 м, но на участках, где река подмывает террасы, их высота увеличивается до 10-15 м. На нижнем участке Туул пересекает горный хребет, редко разветвляется на рукава и течет в одном русле 30-35 км (Кузнецов, 1959).

Нижнее течение р. Туул характеризуется повышенным содержанием взвешенных частиц. В увеличении стока наносов основную роль играет антропогенная нагрузка: влияние промышленности Улан-Батора в верхнем течении, распаханность территории бассейна и добыча золота открытым способом в нижнем течении. Последнее оказывает

наибольшее воздействие на трансформацию вод и речной долины под воздействием многолетней золотодобычи, в пределах месторождения Заамар, с использованием драг, зачастую расположенных непосредственно в русле реки. В результате формируется антропогенно-преобразованный рельеф со сложной системой запруд и мелких водотоков, отгороженных от основного русла р. Туул насыпными грядами отвалов (рис. 1.2.7). Согласно данным совместного доклада английских и монгольских исследователей (Kratz et al., 2010), площадь территории, затронутой золотодобычей на прииске «Заамар» составляет более 4000 га.



Рисунок 1.2.7 Модельный участок р. Туул и территория месторождения золота «Заамар»

### Входные данные для модельного участка р. Туул и р. Орхон

Создание расчетной системы на участок р. Туул и р. Орхон включил в себя подготовку геометрических данных и обработку гидрологической информации. В качестве исходных данных были использованы: ЦМР (цифровая модель рельефа), снимок Landsat (разрешение 30 м), данные промеров русла, полученные в ходе экспедиции 2011-2013 гг. На основе этих данных был подготовлен исходный файл морфометрии русла рек. Для этого использовалась ЦМР, дополненная отсутствующей информацией о батиметрии русла. Таким образом, была подготовлена комплексная цифровая модель местности (ЦММ).

С космических снимков Landsat была оцифрована центральная линия потока, а также границы русла. Посредством интерполяции измеренных поперечных профилей с

помощью специальной функции в дополнении к ArcGIS - HEC-GeoRAS создавалась батиметрия русла. Была создана цифровая модель местности с морфологией русла реки, на основе которой выполнялась работа в приложении HEC-GeoRAS.

Последовательно выполнялись следующие операции: оцифровка центральной линии и берегов русла, построение новых поперечных сечений с занесенной информацией о высотах, взятой с ЦММ (цифровой модели местности), причем центральная линия и линии берега использовались те же что и при создании батиметрии русла. После создания всех необходимых векторов были созданы новые поперечные сечения, которые можно использовать для создания модели. Среднее расстояние между двумя соседними примерно составило 180 м.

Последняя часть работы с использованием HEC-GeoRAS заключалась в создании слоя с внесенными данными о значениях коэффициента шероховатости Маннинга для русла и поймы. Эта процедура по подготовке входных геометрических данных является заключительной, после чего данные можно экспортировать в HEC-RAS для создания модели движения наносов.

### 1.3 Описание экспертно-аналитической системы

В более широком пространственном разрешении выполняется подготовка экспертно-аналитической модели транспорта загрязнителей по длине р. Туул-Орхон-Селенга до дельты р. Селенги.

Для решения задачи обзорного моделирования стока наносов в речных системах был разработан специализированный программный модуль для ГИС-пакета Esri ArcGIS for Desktop 10.1. Входная информация для моделирования включает в себя цифровую модель рельефа, разрешение (шаг) моделирования, а также линии гидрографической сети с привязанными к ним атрибутами, содержащими данные об объеме наносов различной гидравлической крупности и расходах воды. Данные о речной сети должны быть полностью согласованы с цифровой моделью рельефа для корректного моделирования продольных уклонов русла. Для этого речная сеть выделяется автоматически по цифровой модели рельефа.

#### Общие теоретические положения:

1. Модель представляет собой экспертно-аналитическую систему, позволяющую оперативно рассчитывать дальность распространения загрязнителей (твердых минеральных частиц и консервативных примесей);
2. Система основана на одномерных и «0-мерных» эмпирических и аналитических уравнениях;

3. Транспорт загрязнителей рассчитывается от створа, на котором наблюдается поступление загрязняющих веществ, для точечных источников загрязнений (сбросы сточных вод), и от замыкающего створа воздействия для диффузионных источников загрязнения (смыв с поверхности водосбора, в том числе разработки полезных ископаемых в долинах рек, русловые карьеры);
4. В качестве исходной информации используется цифровая модель рельефа (ЦМР) (на основе открытых гидрографических ресурсов на базе SRTM – HYDRO1K <https://lta.cr.usgs.gov/HYDRO1K> или HYDROSHEDS <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php>) и вводимые параметры для входного створа (створа загрязнения) и боковых притоков;
5. Расчетная схема применяется к автоматически задаваемой линейной схеме речной сети, которая генерируется на основе ЦМР;
6. Система основана на следующих общих допущениях:
  - характер потока – ламинарный,
  - отсутствие взаимодействия подземных и русловых вод,
  - отсутствие привноса боковыми притоками рассчитываемых загрязнителей,
  - отсутствие ниже по течению плотин,
  - отсутствие других техногенных источников воздействия по длине речной сети,
  - участок воздействия и створ полного перемешивания расположены на бесприточном участке реки;
  - тонкодисперсные илистые частицы (средний диаметр  $d < 0,001$  мм) считаются не осаждаемыми в речном потоке;
7. Расчет ведется для суточных объемов поступления загрязнителей в реку;
8. Ввиду того, что поток ламинарный, за время  $dt$  частица переносится по течению со скоростью  $U_x = U_x(z)$  на расстояние  $dx = U_x dt$  и оседает под действием силы тяжести  $dz = -w dt$ ;
9. Осаждение частиц происходит равномерно на всей длине реки от участка воздействия;
10. Расстояние  $L$  от створа достаточного перемешивания, на котором происходит осаждение частицы, находящейся при  $x = 0$  на свободной поверхности и при скорости течения осреднённой на вертикали, на дно рассчитывается следующим образом:

$$L = \int_0^L dx = \int_0^L \left( \frac{u_x dt}{dx} \right) dx = \int_h^0 u_x \left( -\frac{dz}{w} \right) = \frac{1}{w} \int_0^h u_x dz = \frac{h\bar{v}}{w}. \quad (1.3.1)$$

### Начальные и граничные условия

Наполнение атрибутов линий осуществляется оператором в интерактивном режиме, при этом обязательно помечаются первый и последний сегмент водотока, между которыми необходимо восстановить изменение концентрации взвешенных частиц. Расходы воды с втекающих водотоков заносятся в атрибуты сегментов основного водотока, идущие сразу после створа в котором происходит слияние. Таким образом, атрибутируются только сегменты основного водотока.

После того, как заданы все параметры, запускается инструмент расчета концентраций. На первом шаге осуществляется автоматическая сцепка сегментов линий, образующих основной водоток (на основе касания крайних точек), а также определяется направление тока (на основе высот, снятых с цифровой модели рельефа). После того, как речная сеть восстановлена, происходит расчет концентрации наносов с использованием описанной выше методики.

Начальные и граничные условия могут быть заданы пользователем или рассчитаны автоматически. Перечень таких условий представлен в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1

Начальные и граничные условия для экспертно-аналитической модели

<b>Начальные условия</b>	<b>Граничные условия</b>
Тип переносимого материала (консервативные вещества в растворенном состоянии или твердые частицы)	Тип русла (прямолинейное, меандрирующее, разветвленное)
Водность реки (расход воды, м <sup>3</sup> /с) на участке в створе воздействия	Уклоны русла по длине речной сети для бесприточных участков и разных типов русла (прямолинейное, меандрирующее, разветвленное)
Концентрация вещества (пофракционный расход наносов, кг/с) выше участка техногенного воздействия	Водность притоков (расход воды Q, м <sup>3</sup> /с) ниже по речной сети
Характер поступления материала в реку: выпуск загрязненных вод (при выпуске на фарватере, при выпуске у берега)	
Характеристика гидрологических условий транспорта наносов (ввод характерных коэффициентов шероховатости)	
Расход воды Q <sub>техн</sub> и содержание загрязняющих веществ (S <sub>техн</sub> , кг/м <sup>3</sup> ) поступающего материала в реку при выпуске загрязненных вод	

Приведённые в таблице 1.3.1 характеристики могут быть рассчитаны или найдены с помощью методов предложенных ниже.

1. Определение морфодинамических типов русла (МРТ) на основе линейризации русловой сети (табл. 1.3.2).

Таблица 1.3.2

Морфодинамические типы русла

МРТ	Параметры русла по линейризации речной сети
Прямолинейный	Нет островов, $L/l < 1,25$
Меандрирующий	С островами, $L/l > 1,25$
Разветвленный	Наличие островов

Примечание: L – длина участка русла; l – длина прямой линии, соединяющий верхний и нижний створ.

2. Ввод характерных коэффициентов шероховатости  $n$  (табл. 1.3.3):

Таблица 1.3.3

Рекомендуемые значения коэффициентов шероховатости  $n$

Характеристика русел и пойм			
$n$	Равнинные реки	Полугорные и горные реки	Поймы
0,020	Прямолинейные русла канализированных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	-	-
0,025	Естественные земляные русла в благоприятных условиях, чистые, прямые, со спокойным течением	Искусственные отводы русел, высеченные в скале	Ровная чистая пойма с низкой травой без сельскохозяйственного использования
0,030	Гравийно-галечные русла в тех же условиях	Гравийно-галечные русла в благоприятных условиях (чистые, прямые). $J = 0,8 ‰ - 1,0 ‰$	Ровная пойма под пашней без посевов и пастбищем с низкой травой
0,040	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков с некоторыми неправильностями в направлениях струй, неровностями дна и берегов и влечением донных наносов	Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в благоприятных условиях. Правильные хорошо разработанные галечные русла в нижнем течении. $J = 0,8 ‰ - 1,0 ‰$	Ровная пойма, занятая зрелыми полевыми культурами, пастбищем с высокой травой и вырубками без побегов, небольшое количество староречий и мелких просек
0,050	Значительно засоренные русла больших и средних рек, частично заросшие или	Значительно засоренные каменистые русла с бурным течением. Периодические	Пойма, поросшая редким кустарником и деревьями (весной без листвы), изрезанная староречьями

Характеристика русел и пойм			
<i>n</i>	Равнинные реки	Полугорные и горные реки	Поймы
	каменистые, с беспокойным течением. Чистые русла периодических водотоков	водотоки с крупногалечным покрытием ложа. $J = 7 \text{ ‰} - 15 \text{ ‰}$	
0,065	Скалистые русла больших и средних рек. Русла периодических водотоков, засоренные и заросшие	Галечно- валунные русла с бурным течением. Засоренные периодические водотоки. $J = 15 \text{ ‰} - 20 \text{ ‰}$	Пойма под редким кустарником и деревьями с листвой или вырубками с развивающейся порослью
0,080	Речные русла, значительно заросшие, с промоинами и неровностями дна и берегов	Валунные русла в средней и верхней частях бассейна и периодические водотоки с бурным течением и взволнованной водной поверхностью $J = 50 \text{ ‰} - 90 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые кустарником средней и большой густоты (весной без листвы)
0,100	Русла рек, сильно заросшие, загроможденные стволами деревьев и валунами	Русла водопадного типа преимущественно в верховьях с крупновалунным ложем и бурным течением. $J = 90 \text{ ‰} - 200 \text{ ‰}$	Поймы, занятые лесом при уровне ниже ветвей и кустарником средней и большой густоты с листвой
0,140	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	Русла с завалами из валунов и обломков скал и валунами. $J = 90 \text{ ‰} - 200 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые лесом при затоплении ветвей и густым ивняком
0,200	-	Русла с завалами из валунов и обломков скал	Глухие, сплошь заросшие, труднопроходимые поймы таежного типа

3. Определение ширины русла при отсутствии информации происходит по региональным зависимостям вида  $B = a(Q)^b$ . Вводятся региональные значения коэффициентов  $a$  и  $b$  (табл. 1.3.4).

Таблица 1.3.4

Рекомендуемые значения коэффициентов  $a$  и  $b$  зависимости  $B = a(Q)^b$

Река	Коэффициенты в зависимости $B = a(Q)^b$	
	$a$	$b$
Верхняя Обь, широкопойменная русловая многорукавность	20,2	0,45
Лена, широкопойменная разветвленное русло	12,1	0,54
Енисей, устьевая область	21,3	0,51
Осередковая многорукавность, р. Терек	4,8	0,37

4. Определение глубины русла по характерным зависимостям  $h = f(B, MPT)$  для сегментов русла на основе таблицы 1.3.5:

Таблица 1.3.5

Значения коэффициента  $k$  зависимости  $h = 1/k(B)$

Морфодинамический тип русла (МРТ)	Коэффициент $k$
Прямолинейный	40
Меандрирующий	65
Разветвленный	100

5. Определение средней скорости течения в сегментах русла по формуле Шези-Маннинга:

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} \sqrt{I}, \quad (1.3.2)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости,  $h$  – глубина русла.

6. Гидравлическая крупность частиц для разных диапазонов крупности определяется по схеме (табл. 1.3.6):

Таблица 1.3.6

Гидравлическая крупность при разном диаметре взвеси

Тип грунта	Диаметр $n$ -фракции $d$ , мм	Гидравлическая крупность $w$ , м/с
Глина	<0,001 мм	0,0000070
Ил	0,001-0,01 мм	0,0000125
Пыль	0,01-0,1 мм	0,0017300
Песок	0,1-1 мм;	0,0540
Мелкий гравий	1-5 мм	0,1765
Крупный гравий	5-10 мм	0,249

7. Каждой крупности соответствуют разные характерные плотности грунта (табл. 1.3.7):

Таблица 1.3.7

Характерные плотности грунта разных грунтов

Тип грунта	Диаметр $n$ -фракции $d$ , мм	Плотность грунта $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Глина	<0,001 мм	600
Ил	0,001-0,01 мм	700
Пыль	0,01-0,1 мм	800
Песок	0,1-1 мм;	1300
Мелкий гравий	1-5 мм	1900

Крупный гравий	5-10 мм	2000
----------------	---------	------

8. Определяется протяженность расчетных участков  $L_i$ , соответствующих бесприточным участкам разных типов русел. Удаленность верхней границы каждого  $i$ -того расчетного участка от створа воздействия определяется по формуле:

$$L = \sum L_i, \quad (1.3.3)$$

где  $i$  – номера участков выше расчётного створа.

Такие участки  $i$  – являются бесприточными сегментами русловой сети между притоками с подразделением на типы русла  $i-1$  и  $i$  (рис. 1.3.1).

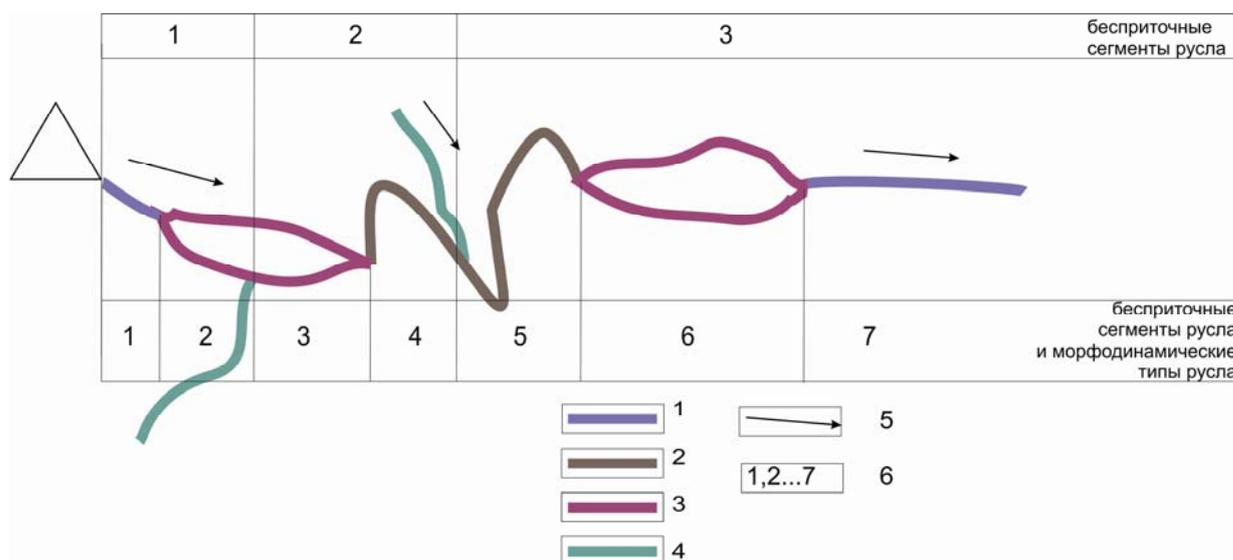


Рисунок 1.3.1 Схема дробления речной сети и введения индексов (6) (1 – прямолинейное, 2 – меандрирующее, 3 – разветвленное) и боковых притоков (4) ниже створа воздействия; 5 – направление течения

### Расчёт дальности распространения загрязнителей

После введения начальных и граничных условий проводится расчёт расхода наносов или консервативной примеси:

1. Пофракционный расход наносов  $R_n$ , поступающий в результате техногенного воздействия:

Вводится информация о количестве (расход наносов, кг/с) поступаемых в реку частиц различной крупности (<0,001 мм; 0,001-0,01 мм; 0,01-0,1 мм 0,1-1 мм; > 1 мм).

2. Определение створа полного перемешивания:

Створ достаточного перемешивания зависит от расхода воды и может быть вычислен по формуле Хэлла:

$$L_{д.п.} = k \cdot Q^{1/3}, \quad (1.3.4)$$

коэффициент  $k$  зависит от характера выпуска загрязнённых вод: 50 – при поступлении частиц на фарватере, 200 – при выпуске у берега.

3. Определение мутности воды  $S$  и расхода наносов  $R$  в створе полного перемешивания:

В зависимости от выпуска загрязнённых вод (на фарватере, у берега) формула следующая:

$$R = QS + \sum R_n, \quad (1.3.5)$$

где  $Q$  – расход воды в реке,  $S$  – естественная мутность воды (выше створа загрязнения),  $R_n$  – расходы наносов, поступающих в русло фракций.

Мутность воды в створе полного перемешивания  $S_0$  определяется как:

$$S_0 = S + \sum R_n / Q. \quad (1.3.6)$$

4. Определение расходов воды и наносов всех бесприточных участков по длине реки ниже участка воздействия:

Для участков между узлами слияния (бесприточные участки) по длине речной сети рассчитывается расход воды  $Q$  на основе уравнения водного баланса:

$$Q_{02} = Q_0 + Q_1, \quad (1.3.7)$$

где  $Q_0$  – расход воды выше узла слияния рек;  $Q_1$  – расход воды в притоке.

5. Пофракционный расчет дальности распространения поступающих твердых частиц:

5.1 Для частиц диаметром  $< 0,001$  мм (глина):

В соответствии с уравнением смешения концентрация глинистых частиц с  $d < 0,001$  мм мутность  $S$  (состоящая из частиц размером  $< 0,001$  мм) в реке ниже впадения бокового притока равна:

$$S_i = \frac{Q_0 S_{0_{i-1}} + Q_i S_i}{Q_i + Q_0}, \quad (1.3.8)$$

здесь  $Q_i$ ,  $S_i$  – расход воды и концентрация в главной реке выше впадения притока.

5.2 Для частиц крупностью более 0,001 мм:

Расчет ведется для осредненных в сечении потока гидравлических характеристик по формуле. Для каждой  $n$ -ой фракции наносов:

$$LA_n = 1,3 \frac{hv}{\omega_n}, \quad (1.3.9)$$

где  $h$  – средняя глубина потока (м),  $v$  – средняя скорость потока (м/с),  $\omega$  – гидравлическая крупность минеральных частиц (м/с), 1,3 – эмпирический коэффициент. Для 1-го расчетного участка формула будет представлена в виде:

$$LA_{n1} = 1,3 \frac{h_1 v_1}{\omega_n}, \quad (1.3.10)$$

Например, для фракции ила (0,001-0,01 мм) расчет для первого участка выглядит следующим образом:

$$LA_{(0,001-0,01)_1} = 1,3 \frac{h_1 v_1}{\omega_{(0,001-0,01,мм)}} = 1,3 \frac{h_1 v_1}{0,00125}, \quad (1.3.11)$$

где 0,00125 – гидравлическая крупность ила,  $V_1$  – скорость течения на первом участке,  $h_1$  – глубина на первом участке. В случае, если  $LA_{n1} > L_1$ , где  $L_1$  – длина первого участка (начиная от створа полного перемешивания), то:

- a) рассчитывается доля осевших на первом участке частиц данной крупности:

$$\%_{n1} = (LA_{n1}/L_1)100\%; \quad (1.3.12)$$

- b) рассчитывается масса грунта фракции  $n$ , осевшей в пределах 1-го участка:

$$\Delta_{n1} = \%_{n1} R_n; \quad (1.3.13)$$

- c) пофракционная оценка объема материала, осаждающегося в русле, рассчитывается для каждой размерности грунта  $n$  как равномерная величина на длину участка  $LA_n$ . Вычисляется мощность осаждающегося материала  $\delta$  (мм) по формуле:

$$\delta_{1n} = 10^3 \frac{\Delta_{1n}}{\rho_n F_1}, \quad (1.3.14)$$

Например, для фракции ила (0,001-0,01 мм) расчет для первого участка выглядит следующим образом:

$$\delta_{1(0,001-0,01,мм)} = 10^3 \frac{\Delta_{1(0,001-0,01,мм)}}{\rho_n L_{1(0,001-0,10,мм)} B_1}, \quad (1.3.15)$$

где  $10^3$  – коэффициент перехода к размерности мм в значении толщины наилка;  $\rho$  – плотность грунта данной крупности  $n$ ;  $F_A$  – площадь дна реки (м<sup>2</sup>) в пределах расчётной зоны:

$$F_1 = L_1 \cdot B_1; \quad (1.3.16)$$

- d) рассчитывается величина  $R_{n2}$ , соответствующая массе грунта, поступающего на второй участок:

$$R_{n2} = R_n - \Delta_{n1}; \quad (1.3.17)$$

- e) Расчеты 1-4 повторяются для второго участка. При этом величина  $R_{n2}$  используется в формуле (1.3.4) вместо величины  $R_n$ .
- f) Аналогично расчеты повторяются для участков 3... $i$  до тех пор, пока  $LA_{ni} < L_i$ . При достижении этого условия для участка  $i$  количество осаждаемого материала фракции  $n$  равно массе привнесенного материала фракции с верхнего участка:  $R_{ni} = \Delta_{ni+1}$ . Рассчитывается мощность осевшего слоя данной фракции  $n$  в пределах участка  $L_i$  до створа полного осаждения  $LA_{ni}$ :

$$\delta_n = 10^3 \frac{\Delta_{ni}}{\rho_n F_{LAi}}, \quad (1.3.18)$$

$$\delta_{(0,001-0,01 \text{ мм})} = 10^3 \frac{\Delta_{i(0,001-0,01 \text{ мм})}}{700 F_{LAi}}, \quad (1.3.19)$$

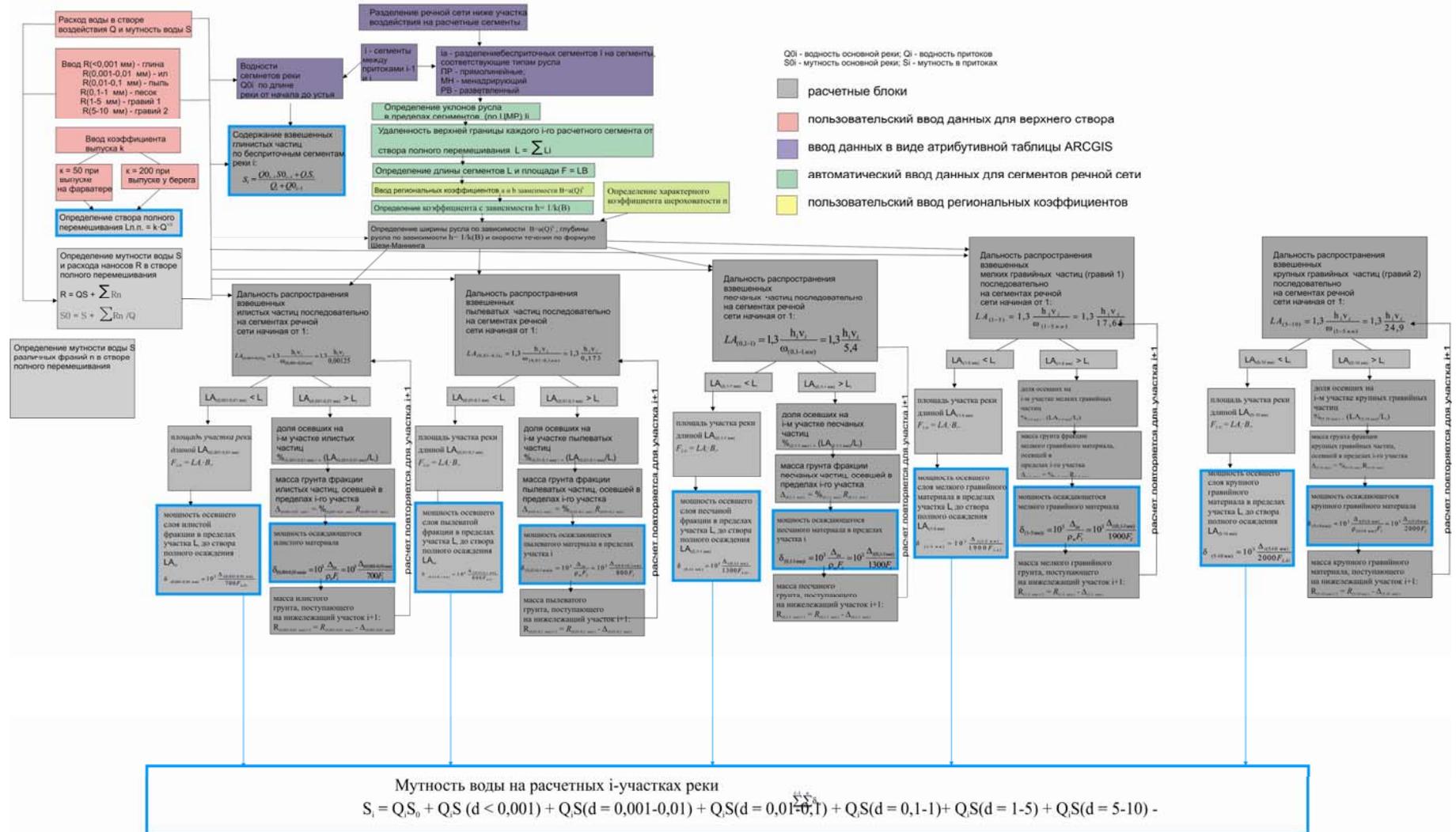
где  $F_{LAi} = LA_i \cdot B_i$ .

- g) Мутность воды на расчетных  $i$ -участках реки равна:

$$S_i = Q_i S_0 + Q_i S_{(d < 0,001)} + Q_i S_{(d = 0,001-0,01)} + Q_i S_{(d = 0,01-0,1)} + Q_i S_{(d = 0,1-1)} + Q_i S_{(d = 1-5)} + Q_i S_{(d = 5-10)}. \quad (1.3.20)$$

Представленная выше методика расчёта отображена блок-схеме экспертно-аналитической модели (рис. 1.3.2).

Результат моделирования представляются в виде точек, расставленных с заданным шагом вдоль линии водотока, в каждой из которых известна концентрация по всем градациям частиц. На основе полученных точек в целях визуализации восстанавливается набор растровых линий, в пикселах которых представлены те же концентрации. Результаты могут быть экспортированы в табличный и текстовый вид для их последующего анализа в специализированных (в том числе статистических) программных средствах.



## 1.4. Описание региональной модели водного баланса р. Селенга (ECOMAG, Weap, New LocClim)

В настоящем разделе рассмотрены принципиальные подходы к моделированию водного баланса бассейна р. Селенга: пространственно-распределенные модели гидрологического цикла и формирования стока; водохозяйственные экспертно-аналитические модели; региональные гидроклиматические модели. Рассматриваются их применимость для использования при оценке последствия реализации водохозяйственных мероприятий в бассейне Селенги.

### 1.4.1. Модель формирования стока. Структура гидрологической модели ECOMAG

#### Структура гидрологической модели ECOMAG

Математическая модель формирования стока в речных бассейнах ECOMAG, использованная для решения задач настоящего проекта – версия пространственно-распределенной модели гидрологического цикла и формирования стока в речных бассейнах (Motovilov et al., 1999a; Motovilov et al., 1999b). Модель построена в соответствии со следующей схемой принимаемых во внимание процессов. В летний период выпадающие осадки в виде дождя частично проникают в почву. Избыток воды, не поглощенный почвой, после заполнения депрессий на поверхности бассейна перемещается по уклону поверхности в речную сеть. Часть влаги, впитавшейся в почву, может перемещаться по уклону по временным относительно непроницаемым водоупорам. Вода, не попавшая в речную сеть, расходуется на испарение или дренаж в более глубокие горизонты почвы. В холодный период года рассматриваемая схема дополняется учетом гидротермических процессов в снежном покрове и почве (формирование снежного покрова и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвы, инфильтрации талых вод в мерзлую почву).

Пространственная структура модели ECOMAG базируется на принципах ландшафтных единиц, называемых «элементы». Их структура позволяет отразить пространственные неоднородности рельефа, почв, землепользования, строения гидрографической сети, а также учесть пространственные особенности полей внешних гидрометеорологических воздействий.

При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется регулярной или нерегулярной сеткой на отдельные ландшафтные элементы с учетом особенностей рельефа, структуры речной сети, местоположения типов почв, растительности, землепользования и т.д. (рис. 1.4.1)

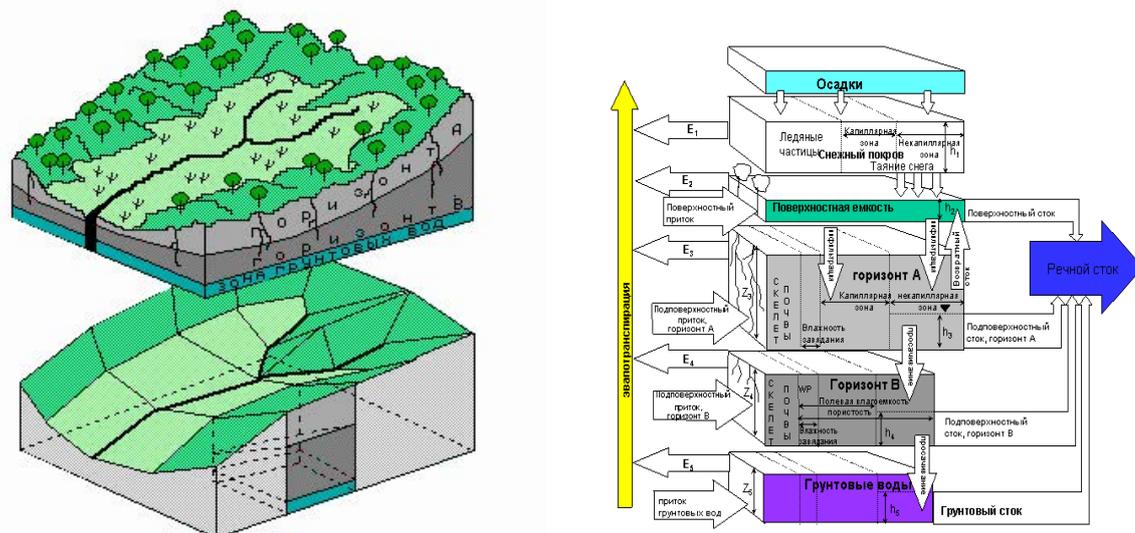


Рисунок 1.4.1 Схематизация речного бассейна и структура гидрологической модели для элементарной площадки

Моделирование гидрологических процессов на каждом ландшафтном элементе выполняется для четырех уровней: для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова. Схема заканчивается рассмотрением процессов трансформации воды в речной сети.

Основные уравнения модели ECOMAG, описывающие процессы гидрологического цикла обыкновенными дифференциальными уравнениями, получены путем интегрирования по пространству соответствующих уравнений в частных производных детальных физико-математических моделей. Такого рода упрощенные физически обоснованные модели в иерархии типов гидрологических моделей занимают промежуточное место между пространственно-распределенными физико-математическими моделями и пространственно-распределенными емкостными концептуальными моделями, и в этом смысле упрощенные физически обоснованные гидрологические модели могут рассматриваться как пример введения представлений и элементов пространственно-распределенных физико-математических моделей в распределенные концептуальные гидрологические модели. Такие модели сохраняют основные черты и преимущества пространственно-распределенных физико-математических моделей и в то же время более эффективны при решении прикладных задач, т.к. они менее требовательны к составу и полноте исходной информации, а также

малочувствительны к ошибкам в задании этой информации. Ниже дано описание в модели основных гидрологических процессов.

В течение теплого периода года для описания процессов используются следующие алгоритмы.

Горизонт А почвы (индекс 1). Предполагается, что пространственная функция распределения (F) поверхностной гидравлической проводимости насыщенной почвы (K) для каждого элемента речного бассейна описывается экспоненциальной функцией распределения вероятности

$$F(K) = 1 - \exp(-\alpha K), \quad \alpha = \frac{1}{K_m}, \quad (1.4.1)$$

где  $K_m$  – среднее значение K на элементе.

Если предположить, что для каждой точки области имеют место следующие соотношения между интенсивностью осадков R и инфильтрацией V:  $V = K$ , при  $R \geq K$  и  $V = R$ , при  $R < K$ , то для всего элемента площади средняя интенсивность инфильтрации в почву ( $V_1$ ) равна

$$V_1 = \int_0^R \exp(-\alpha K) dK = K_m [1 - \exp(-R / K_m)] \quad (1.4.2)$$

Суммарная пористость P в горизонте почвы разделяется на две части: капиллярную зону (верхний предел влажности почвы - полевая влагемкость, FC) и некапиллярную зону (разность, D, между P и FC). Разделение впитавшейся влаги между зонами для каждого ландшафтного элемента производится с учетом пространственной функции распределения полевой влагемкости, которая описана показательной функцией (Мотовилов, 1993)

$$F(FC) = \left( \frac{FC}{FCM} \right)^\beta, \quad (1.4.3)$$

где FCM – максимальное значение FC на ландшафтном элементе;  $\beta$  – параметр функции

распределения. Среднее значение FC на элементе ( $FC_m$ ) равно  $FC_m = FCM \frac{\beta}{\beta + 1}$ .

С учетом (1.4.3) инфильтрация впитавшейся воды в капиллярную зону равна

$$V_{1,c} = V_1 [1 - (W_l / FCM)^\beta], \quad (1.4.4)$$

а просачивание в некапиллярную зону –

$$V_{1,nc} = V_l (W_l / FCM)^\beta, \quad (1.4.5)$$

где  $W_l$  – объемная влажность почвы.

*Капиллярная зона.* Водный режим капиллярной зоны почвы в горизонте А рассчитывается с использованием следующего уравнения

$$Z_1 \frac{dW_1}{dt} = V_{1,c} - E_1, \quad (1.4.6)$$

где  $Z_1$  – глубина горизонта А,  $E_1$  – интенсивность эвапотранспирации, которая рассчитывается как:

$$E = \begin{cases} k_e d, & \text{при } W > W_e, \\ k_e d(W - W_e), & \text{при } W < W_e, \end{cases} \quad (1.4.7)$$

где  $W_e = (FC + WP)/2$ ,  $WP$  – влажность завядания,  $d$  – дефицит влажности воздуха,  $k_e$  – эмпирический коэффициент.

*Некапиллярная зона.* Предполагается, что вода, которая поступает в некапиллярную зону, может проникать в горизонт В с интенсивностью  $V_2$ , равной насыщенной гидравлической проводимости почвы  $K_2$  в горизонте В. Если  $V_{1,nc} > K_2$ , то впитавшаяся вода может накапливаться в некапиллярной зоне и перемещаться в направлении преобладающего уклона  $i$  по относительно водонепроницаемой поверхности между горизонтами А и В. В период ливневых осадков некапиллярная зона горизонта А может полностью заполниться и тогда на этой области будет формироваться возвратный поверхностный сток. Предполагается, что подповерхностный сток может быть описан законом Дарси. Для описания режима влаги в некапиллярной зоне используется следующее уравнение

$$\frac{D_l}{2} \frac{d}{dt} (b_L h_{l,L} + b_0 h_{l,0}) = (V_{1,nc} - R_r - V_2) b_m - (Q_{l,L} - Q_{l,0}) / L, \quad (1.4.8)$$

где  $K_x$  – гидравлическая проводимость насыщенной почвы в горизонтальном направлении,  $h_l$  – уровень воды в некапиллярной зоне,  $b$  и  $L$  – ширина и длина ландшафтного элемента в плане,  $b_m$  – средняя ширина элемента,  $Q_l$  – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс  $L$ ) подповерхностных вод для ландшафтного элемента,  $R_r$  – интенсивность притока возвратных вод на поверхность, который формируется из-за избытка подповерхностного потока ( $bK_x i h$ ) над максимальной фильтрационной способностью горизонта ( $bK_x i Z$ ),  $Q_l = bK_{x,l} i h_l$ ,  $D_l = P_l - FC_1$ ,  $V_2 = K_2$ ,  $b_m = \frac{b_L + b_0}{2}$ .

Индексами 0 и  $L$  обозначаются величины на верхней и нижней границах планового ландшафтного элемента.

*Горизонт В почвы (индекс 2).* Режим влажности почвы в горизонте В описан уравнениями

$$Z_2 \frac{dW_2}{dt} = V_2 - V_3, \quad (1.4.9)$$

где  $V_3$  – интенсивность просачивания почвенной влаги из горизонта В в зону грунтовых

вод, равная  $V_3 = K_2 \left( \frac{W_2 - WP}{P_2 - WP} \right)^4$ .

*Зона грунтовых вод (индекс 3).* Поток грунтовых вод рассчитывается по уравнениям

$$D_3 \frac{d}{dt} (b_L h_{3,L} + b_0 h_{3,0}) = (V_3 + V_G) b_m - (Q_{3,L} - Q_{3,0}) / L, \quad (1.4.10)$$

где  $h_3$  – уровень грунтовых вод,  $Q_3$  – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс  $L$ ) грунтовых вод для ландшафтного элемента, равный  $Q_3 = bK_{x,3} i h_3$ ,  $V_G$  – интенсивность водообмена между верхним горизонтом грунтовых вод и более глубокими слоями.

*Поверхностный сток (индекс 4).* Движение поверхностных вод по склонам описано интегральными уравнениями кинематической волны:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (b_L h_{4,L} + b_0 h_{4,0}) = R_0 b_m - (Q_{4,L} - Q_{4,0}) / L, \quad (1.4.11)$$

где  $h_4$  – глубина поверхностного потока,  $Q_4$  – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс  $L$ ) поверхностных вод для ландшафтного элемента, равный  $Q_4 = i^{1/2} h_4^{5/3} b/n$ ,  $n$  – коэффициента шероховатости Маннинга,  $R_0 = R - V_l + R_r$ .

В течение холодного периода года для описания процессов используются следующие алгоритмы.

*Формирование снежного покрова и снеготаяние (индекс 5).* Характеристики снежного покрова подвергаются временным изменениям вследствие вновь выпадающих осадков, испарения снега и его таяния, замерзания талой воды в снеге и его уплотнения. Предполагается, что фазовый состав выпадающих осадков  $R$  определяется среднесуточной температурой воздуха  $T$ : при  $T < T_{cr}$  выпадает только снег  $R_s$ , при  $T > T_{cr}$  – только дождь  $R_w$ . Значение  $T_{cr}$  может быть принято из метеорологических данных или подобрано в процессе калибровки параметров модели. Интенсивность снеготаяния  $S$  рассчитывается с помощью коэффициента стаивания и температуры воздуха. Та же процедура используется для описания замерзания талых вод в снеге  $S_f$ . Испарение твердой  $E_s$  и жидкой  $E_w$  фаз снега рассчитывается с использованием данных по температуре воздуха и дефициту влажности водяного пара. Скорость уплотнения снега  $v_s$  описана эмпирическим уравнением Иосида (Yosida, 1955).

Для описания формирования снежного покрова и снеготаяния используется следующая система уравнений (Мотовилов, 1993; 6 Motovilov & Vehvilainen, 1987)

$$\frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{d}{dt} (I h_5) = R_s - E_s - S_T + S_f, \quad (1.4.12)$$

$$\frac{d}{dt} (W_5 h_5) = R_w + S_T - E_w - V_5 - S_f, \quad (1.4.13)$$

$$\frac{dh_5}{dt} = \rho_w \left[ \frac{R_s}{\rho_n} - \frac{S_T + E_s}{\rho_i I} \right] - v_s(h_5, I, W_5), \quad (1.4.14)$$

где  $I$  и  $W_5$  – объемное содержание льда и воды в снеге,  $r_i$  и  $r_w$  – удельный вес льда и воды,  $r_n$  – плотность нового снега,  $h_5$  – глубина снежного покрова,  $V_5$  – водоотдача снежного покрова, которая рассчитывается, принимая во внимание процесс задержания талых вод в снеге под действием капиллярно-сорбционных сил.

*Тепловой режим снега и почвы.* Предполагается, что вертикальные температурные профили в снеге, мерзлой и талой почве незначительно отличаются от линейных и перемещением влаги к фронту промерзания можно пренебречь. При этих условиях динамика глубины промерзания  $H_f$  и глубины оттаивания почвы  $H_T$  может быть описана следующими уравнениями (1.4.13):

$$Q_f \frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda_T T_g}{H_g - H_f}, \quad (1.4.15)$$

$$H_T = \left( H_f^2 + \frac{2\lambda_T T}{Q_f} \delta t \right)^{0.5}, \quad (1.4.16)$$

где  $H_g$  – глубина уровня грунтовых вод с температурой  $T_g$ ,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_f$ ,  $\lambda_T$  – коэффициенты теплопроводности снега, мерзлой и талой почвы, соответственно,  $T_0$  – температура на

границе «почва–снег», равная  $T_0 = \frac{\lambda_s T H_f}{\lambda_s H_f + \lambda_f h_5}$ ,  $Q_f = \rho_w L_f (W - W_u)$  – количество тепла,

выделяемое на фронте промерзания (или поглощаемое на фронте оттаивания)  $L_f$  – скрытая теплота плавления льда,  $W_u$  – содержание незамерзшей влаги в почве при  $0^\circ\text{C}$ .

*Инфильтрация в мерзлую почву.* Инфильтрация талых и дождевых вод в мерзлую почву описана следующими уравнениями

$$V_l = K_f \left[ 1 - \exp\left(-V_5 / K_f\right) \right], \quad (1.4.17)$$

где  $K_f$  – гидравлическая проводимость насыщенной мерзлой почвы, равная

$$K_f = K_l \left( \frac{P_l - \bar{I} - WP}{P_l - WP} \right)^4 / (1 + k_i \bar{I})^2, \quad \bar{I} = \frac{\rho_w}{\rho_i} \frac{H_f - H_T}{Z_1} (W_1 - W_u) \quad \text{– средняя льдистость}$$

промерзшего слоя почвы,  $k_i$  – эмпирический параметр, равный 8.

Речной сток (индекс  $b$ ). Боковой приток к элементу речной сети рассчитывается как

$$Q_{lat} = Q_{1,n} + Q_{3,n} + Q_{4,n}, \quad (1.4.18)$$

где индекс  $n$  обозначает боковой приток в элемент речной сети от соседних к этому элементу левого и правого склонов водосборной площади.

Речной сток на элементе речной сети описан упрощенной версией уравнения кинематической волны

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (b_{6,L} h_{6,L} + b_{6,0} h_{6,0}) = (Q_{lat} + Q_{6,0} - Q_{6,L}) / L_6, \quad (1.4.19)$$

где  $h_6$  – глубина речного потока,  $b_6$  и  $L_6$  – ширина и длина элемента реки в плане,  $Q_6$  – расход воды, равный  $Q_6 = i_6^{1/2} h_6^{5/3} b_6 / n_6$ ,  $n_6$  – коэффициент шероховатости Маннинга,  $i_6$  – уклон реки, (индексы  $O$  и  $L$  обозначают величины на входе и выходе расчетного участка элемента речной сети).

#### Информационные ресурсы

В данном разделе приводится состав информационных ресурсов, привлекаемых для проведения гидрологических расчетов по модели ECOMAG. Объем и пространственное покрытие информационными ресурсами территории России достаточны для проведения расчетов для любых крупных речных бассейнов РФ.

ГИС-обеспечение речных бассейнов. В качестве основных видов информации для формирования баз данных ИМК ECOMAG используются следующие картографические материалы: цифровые топографические карты различных масштабов на территорию страны; цифровые модели рельефа (ЦМР) с разрешением 1 км и 90 м; серии цифровых тематических карт (водных ресурсов, почвенная, ландшафтная и т.д.), отражающих характеристики и состояние природных ресурсов; карты-схемы пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды.

Картографическая информация. Эта информация должна обеспечивать достаточную степень детализации и точности представления информации и содержать все необходимые для поддержки принятия решений данные. Для больших крупных речных бассейнов основные картографические материалы представляются в масштабах 1:1000000, для средних и малых – в масштабе 1:200000 и 1:100000.

Географическая основа цифровых топографических карт содержит границы субъектов РФ, населенные пункты, рельеф суши, гидрографию и гидротехнические сооружения, промышленные, сельскохозяйственные и социально-культурные объекты, дорожную сеть и дорожные сооружения, растительный покров и грунты, подписи и другие элементы содержания.

Из тематических карт для задания характеристик и параметров модели используется почвенная и ландшафтная карты, а также цифровые модели рельефа.

Почвенная карта России в масштабе 1:2500000 разработана коллективом авторов под руководством М.А. Глазовской и представлена в электронном виде Почвенным институтом РАН. Все почвы подразделяются на зональные, интразональные и горные. В районах с частым чередованием различных почв выделены ареалы с определенными сочетаниями почв. Основой для разделения почв является генетическая классификация. Для всех почв указан их механический состав, что особенно важно при задании водно-физических свойств почв.

Ландшафтная карта стран бывшего СССР в масштабе 1:2500000 составлена коллективом авторов под руководством В.А. Николаева и представлена в электронном виде Почвенным институтом РАН. Карта изображает природно-территориальные комплексы регионального порядка, то есть ландшафты. Для разделения ландшафтов использовалась многоступенчатая авторская классификация, согласно которой выделяются следующие иерархические ступени: система ландшафтов (выделяется по водно-тепловому балансу на глобальном уровне), подсистема ландшафтов (по степени континентальности климата), класс ландшафтов (по рельефу – равнинные и горные), тип ландшафтов (по зональным почвенно-биоклиматическим признакам), подтип ландшафтов (по подзональным почвенно-биоклиматическим признакам), род ландшафтов (по генетическому типу рельефа), вид ландшафтов (по сходству доминирующих урочищ).

Информация о рельефе задействована из базы данных, разработанной американским агентством Defense Mapping Agency (DMA). DMA подготовило эти данные в рамках проекта Global Land Base Elevation (GLOBE). GLOBE представляет собой файл, в матричной форме содержащий информацию о рельефе Земли. Размер ячейки сетки матрицы 30 x 30 сек (разрешение 1 км) или 3 секунды (разрешение 90 м).

Оперативное гидрометеорологическое обеспечение. Оперативная информация гидрометеорологического и водохозяйственного мониторинга является одной из основ для проведения гидрологических расчетов с помощью ИМК ЕСОМАГ. По каналам связи оперативная гидрометеорологическая и водохозяйственная информация передается и интегрируется в базах данных ИМК в Росводресурсах.

Банк оперативных гидрологических данных. Ежедневные гидрологические данные передаются с гидропостов в соответствии с кодом КН-15, который предназначен для передачи данных наблюдений на гидрологических постах, расположенных на реках, озерах и водохранилищах. В составе банка данных можно выделить следующие базы данных: а) база данных по уровенному режиму и гидрометеорологической ситуации для

речных гидрометрических постов; б) база данных по уровенному режиму для гидрометрических постов на водохранилищах; в) база данных по притокам и сбросам воды для гидрометрических постов на водохранилищах.

В настоящую время в базу данных поступает информация с более 1200 гидрологических постов (рис. 1.4.2).

*Банк оперативных данных на гидроузлах.* Ежедневные данные по характеристикам водохранилищ и работе гидроузлов крупнейших ГЭС передаются в АО Центральное диспетчерское управление и по каналам связи в ИМК. Банк данных содержит информацию по уровенному режиму в верхних и нижних бьефах водохранилищ, боковому и общему притоку к водохранилищам, сбросам из водохранилищ, их полному и полезному объему, заборам воды из водохранилищ и т.д.



Рисунок 1.4.2 Пункты гидрологических наблюдений, данные измерений на которых включены в информационное обеспечение модели

*Банк оперативных метеорологических данных.* Банк метеорологических данных (по коду КН-01) содержит синоптические метеосводки, которые включают поля со значениями параметров приземного слоя атмосферы (температура воздуха и точка росы, количество осадков за определенное время, направление и скорость ветра, количество облаков и т.д.), а также поля, обеспечивающие пространственно-временную привязку метеосводок. Всего на территории России и сопредельных государств в базе данных задействовано более 4000 метеорологических постов (рис. 1.4.3).

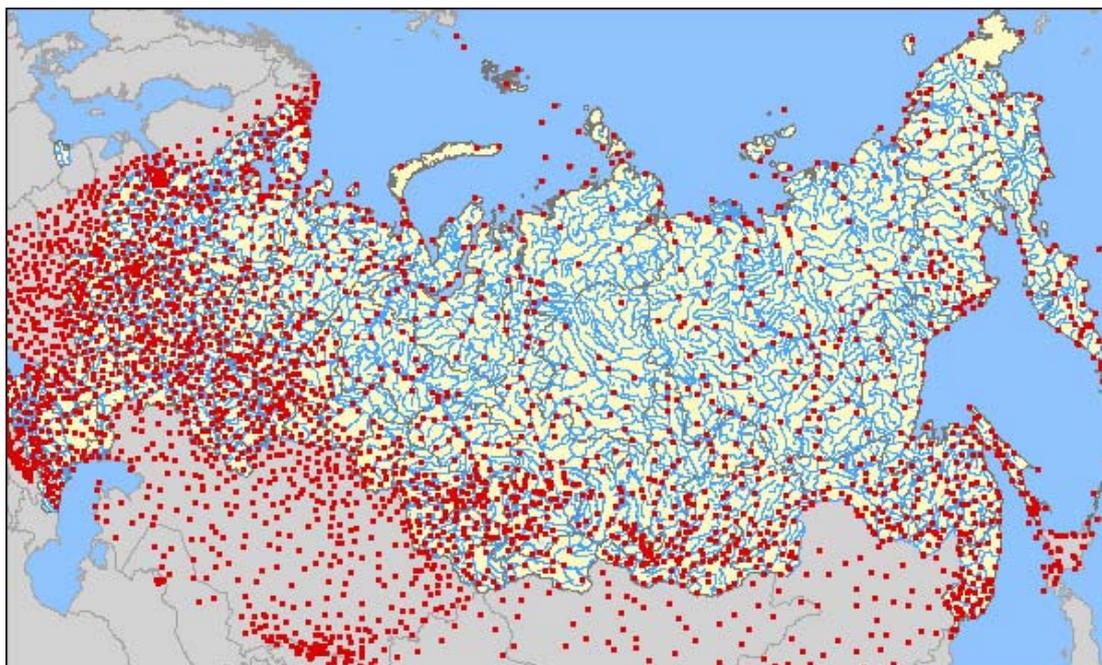


Рисунок 1.4.3 Пункты метеорологических наблюдений, данные измерений на которых включены в информационное обеспечение модели

*Банк оперативных агрометеорологических данных.* Банк данных ежедекадной агрометеоинформации в соответствии с кодом КН-21 содержит сводки, которые включают поля со значениями параметров поверхности земли и зоны аэрации почвогрунтов (послойные запасы продуктивной влаги в почве, глубина промерзания и оттаивания почвы, высота и плотность снежного покрова на полях, наличие ледяной корки на поверхности почвы и т.д.), поля, характеризующие метеорологическую обстановку за прошедшую декаду (максимальная, минимальная и средняя температура воздуха за декаду, сумма осадков, максимальная скорость ветра, число дней с заморозками и оттепелями), а также поля, обеспечивающие пространственно - временную привязку агрометеосводок. Всего на территории России и сопредельных государств в базе данных задействовано около 1500 метеорологических постов (рис. 1.4.4).

*Банк оперативных данных по характеристикам снежного покрова.* Ежедекадные данные о характеристиках снежного покрова передаются в Гидрометцентр России в соответствии с кодом КН-24, который предназначен для передачи данных о характеристиках снежного покрова по снегосъемкам на лесных и полевых участках. База данных по характеристикам снежного покрова содержит сводки, которые включают поля со значениями высоты, плотности и запасов воды в снежном покрове на полевых и лесных участках, а также поля, обеспечивающие пространственно-временную привязку оперативных сводок.

*Архивное метеорологическое обеспечение.* Гидрометеорологическое обеспечение на основе архивных рядов наблюдений позволяет получить статистические характеристики этих рядов для пунктов наблюдений, а также может быть использовано для калибровки параметров моделей гидрологических процессов.

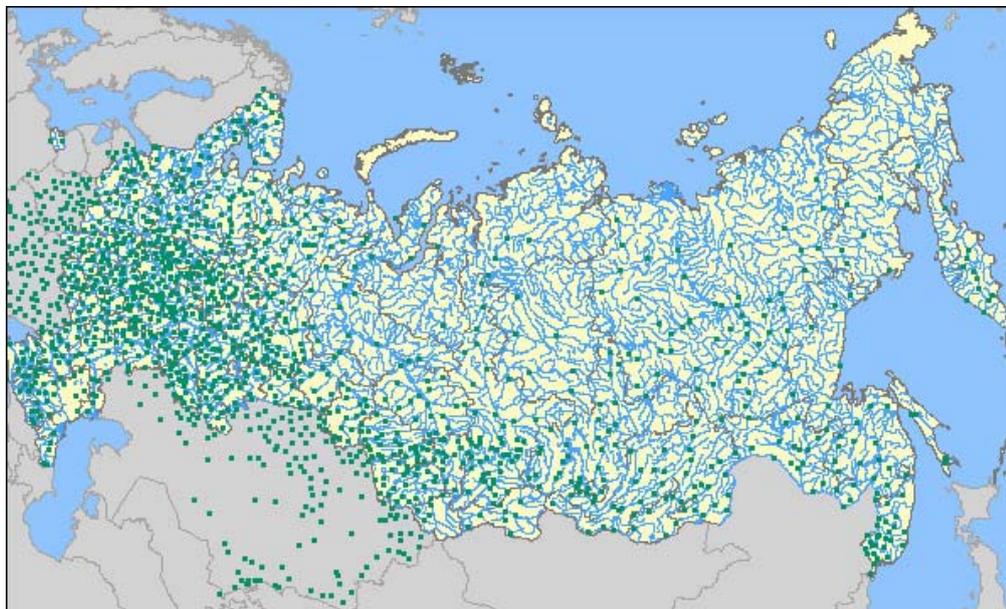


Рисунок 1.4.4 Пункты агрометеорологических наблюдений, данные измерений на которых включены в информационное обеспечение модели

В качестве архивного метеорологического обеспечения в ИМК ECOMAG используется база данных метеорологических наблюдений по 223-м станциям бывшего Советского Союза. Архивы станционных данных содержат записи 24, 6 и 3-часовых наблюдений 24 метеорологических переменных, включая температуру, тип погоды, количество осадков, облачность, давление над уровнем моря, относительную влажность, скорость и направление ветра и др. Среднесуточные наблюдения собраны за период с начала наблюдений на станции (для некоторых станции с конца 1870-х гг.). Шестичасовые наблюдения были собраны за период с 1936 по 1965 г.; трехчасовые наблюдения проводились начиная с 1966 г.

Подводя итоги моделирования формирования стока можно отметить достаточно высокую точность расчетов гидрографов стока как в приустьевых створах, так и в промежуточных пунктах наблюдений. Кроме адекватности гидрологической модели можно выделить следующие основные причины несоответствия фактических и рассчитанных данных и наметить пути их устранения:

1. Для относительно небольших водосборов важную роль начинают играть местные особенности формирования стока, которые в модели учитываются сочетаниями типов почв и растительности и их распределением по территории. Поэтому использование

для этих водосборов, имеющих в наличии электронных карт типов почв и ландшафтов на территорию России масштаба 1:2500000, по-видимому, не достаточно по пространственному разрешению.

2. Кроме факторов подстилающей поверхности, формирование стока в бассейне определяется также метеорологическими воздействиями. И здесь важную роль играет степень освещенности метеорологическими данными территории бассейна.

3. Одной из причин несоответствия фактических и рассчитанных гидрографов стока может служить низкая точность определения фактических расходов воды, в особенности в зимний период и в период весеннего половодья.

#### 1.4.2. Экспертно-аналитические модели региональной оценки водных ресурсов:

##### WEAP

Относительно простой путь оценки последствий реализации водохозяйственных мероприятий предлагают специализированные водохозяйственные экспертно-аналитические системы. Они основаны на решении уравнения водного баланса, компилируемого в зависимости объема от исходных данных:

$$Q_v - Q_n + Q_{bn} - Q_{vz} + Q_{vc} \pm Q_{pp} \pm \Delta Q = 0. \quad (1.4.19)$$

где  $Q_v$  и  $Q_n$  – расходы воды в верхнем и нижнем створах соответственно. В приходные составляющие этого уравнения входят:  $Q_{bn}$  – боковой приток,  $Q_{vc}$  – сбросные воды; в расходные:  $Q_{vz}$  – водозаборы на хозяйственные нужды. Результирующие элементы включают:  $\pm Q_{pp}$  – русловое регулирование,  $\pm \Delta Q$  – изменение водности реки, связанное с подземными водами (знак плюс отвечает условиям инфильтрации руслового стока, минус – условиям питания реки подземными водами).

К таким программным оболочкам относится система Расчета и Планирования Водных Ресурсов (WEAP). Система предполагает вычисление требований на воду, поступлений воды в речную сеть, движения воды, фильтрации воды, мелиоративных норм под конкретные культуры, расходования воды и ее накопление, образования загрязнения, очистки, изменения качества воды при различных гидрологических сценариях и политики в управлении водой. Графический интерфейс с опцией "drag-and-drop", имитирующий ГИС, позволяет легко изменять входную информацию за счет задания, в частности, водопользователей и водопотребителей (рис. 1.4.5).

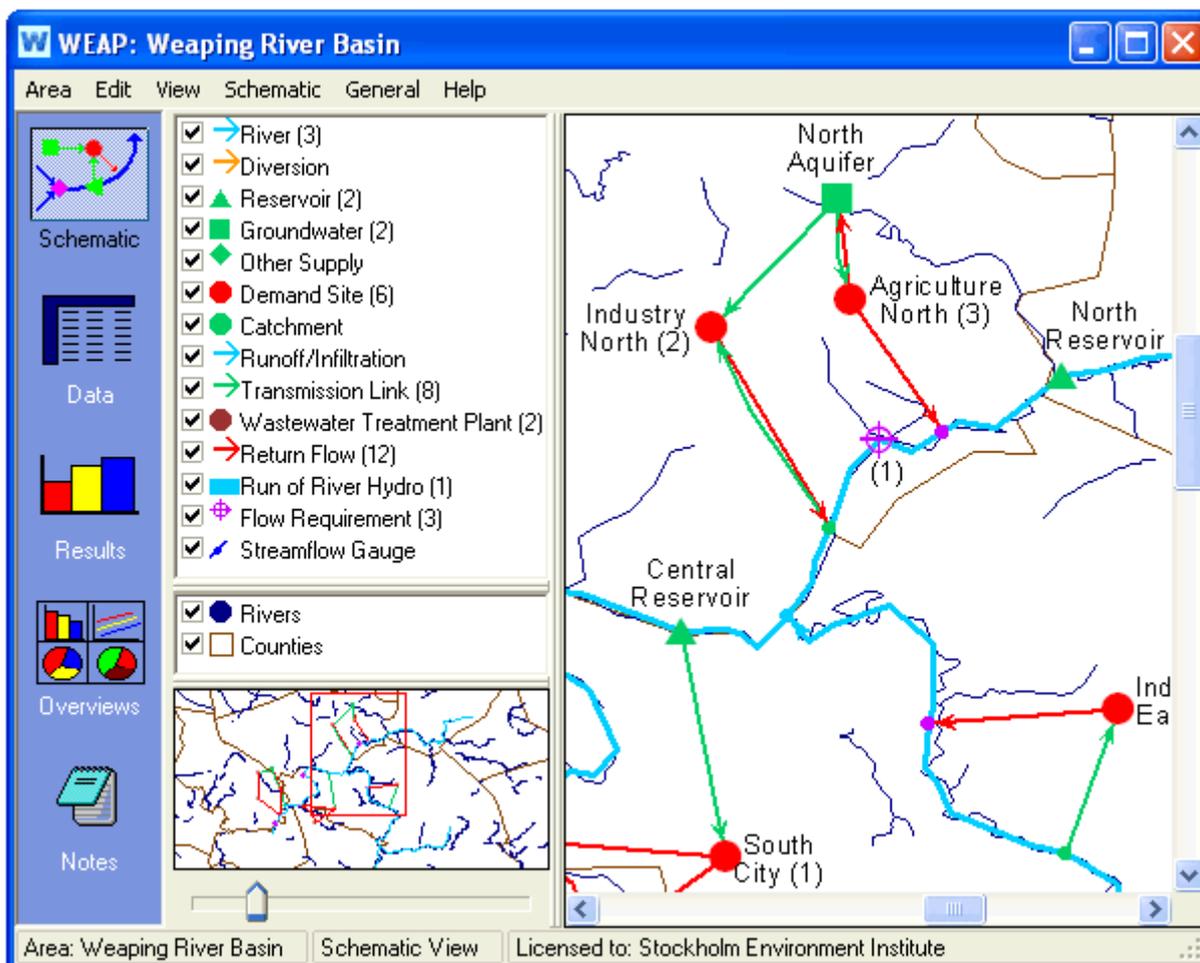


Рис. 1.4.5. Интерфейс программного комплекса WEAP

### 1.4.3. Гидроклиматические модели: New LocClim

В основе гидроклиматического моделирования лежит использование климатических данных для оценки водного режима рек. Оно базируется на упрощенном уравнении водного баланса речного бассейна

$$x = y + z \quad (1.4.20)$$

где  $x$  – средний многолетний слой осадков,  $z$  – средний многолетний слой испарения,  $y$  – средний многолетний слой стока. К этой группе моделей относятся как относительно сложные многоуровневые программы (например, WaterGAP) (Verzano, 2009), так и более простые модели интерполяции метеорологических величин (например, New LocClim). Оба подхода реализуются для бассейна р. Селенги на географическом факультете МГУ с участием проекта Мото (Германия) (Malsy et. al, 2013). При этом в качестве исходной информации рядов гидрометеорологической информации могут быть использованы различные ресурсы (табл. 1.4).

Таблица 1.4. Исходные данные для гидрометеорологического моделирования водного баланса бассейна Селенги

Источник данных	Пространственное разрешение	Временной масштаб	Временной период
Climate Research Unit TS3.2 (CRU)	0.5°	Monthly	1901-2011
Global Precipitation Climatology Centre version 6 (GPCP)	0.5°	Monthly	1901-2010
WATCH forcing data (WFD)	0.5°	Daily	1958-2001 (ERA 40) 1979-2009 (ERA Interim)
Aphrodite's water resources (Aphrodite)	0.25° / 0.5°	Daily	1951-2007

Для задач оперативной оценки последствий хозяйственной деятельности наиболее применимы модели интерполяции метеорологических величин. New LocClim, разработанная Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных наций (FAO) совместно с Немецкой службой погоды (DWD) (Grieser et al., 2006) – это бесплатно распространяемое приложение для оценки регионального климата по всему Земному шару. В программе реализованы многие известные и проверенные алгоритмы интерполяции метеорологических величин в пространстве, такие, как крайгинг, сплайн-интерполяция по модели гибкого листа, метод обратного расстояния, метод Шепарда, взвешивание по направлению и т.д.). При интерполяции также учитываются вертикальные и горизонтальные градиенты метеовеличин в зависимости от рельефа местности. Программа содержит базу данных FAO, включающую данные наблюдений с 30 000 станций по всему миру (Grieser et al., 2006).

Программа отображает данные в нескольких вариантах: в режиме точечных наблюдений, режиме рабочего места для создания карт и в автоматическом режиме создания геоинформационных покрытий для использования в ГИС-системах (рис. 1.4.6).

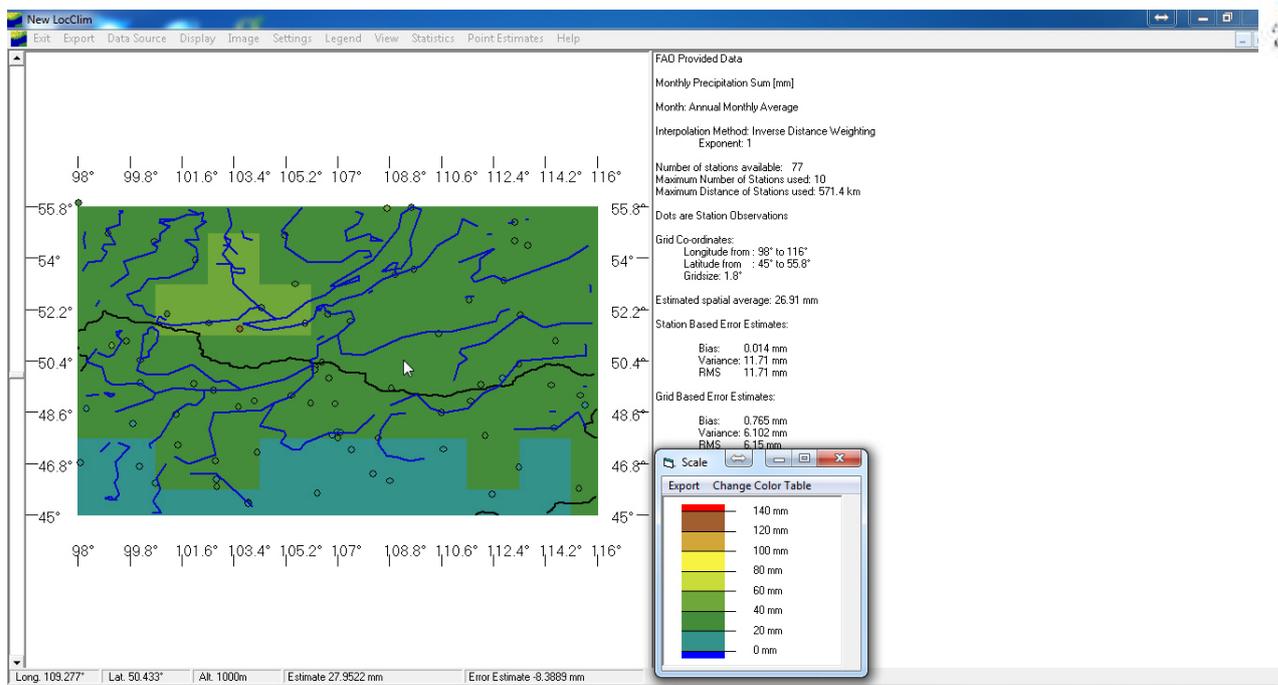


Рис. 1.4.6. Интерфейс модели New LocClim в разрешении бассейна оз. Байкал

В программе формируются табличные и картографические материалы внутригодового хода 8 метеозаписей (среднемесячные значения максимальной, минимальной и средней температуры воздуха, количества осадков, испаряемости, скорости ветра, давления водяного пара, продолжительности солнечного сияния). Также приводятся агрометеорологические характеристики, такие, как начало и окончание вегетационного периода, количество дней с температурами выше определенного значения, сумма положительных температур на указанную дату и т.д. При проведении региональных оценок на карту региона выводятся данные о местоположении исходных метеостанций, интерполированные по сетке значения, а также рассчитывается ошибка интерполяции. Особенности рельефа рассматриваемой территории отображаются на отдельном графике распределения данных наблюдений по высоте местности. Пользователю выдается предупреждение при необходимости экстраполяции исходных данных, или наличия подозрительных значений наблюдений, а также при малом числе окружающих станций. Вся информация может быть экспортирована в виде карт и таблиц.

Результаты использования региональных гидроклиматических моделей для ретроспективного анализа водного баланса бассейна р. Селенги приведены в главе 2.1.

## 2. Промежуточные результаты выполненных оценок водного баланса и миграции загрязнителей

### 2.1 Современные оценки водного баланса рек бассейна Селенги

В данном разделе приводится сопоставление данных из опубликованных источников и материалы оценок составляющих годового водного баланса данной территории, полученных авторами результатов при обработке данных многолетних наблюдений на метеорологических станциях с помощью гидроклиматической модели New\_LocClim. Основными допущениями системы моделирования приняты следующие: 1. Отсутствует поверхностная переброска стока в бассейн р. Селенги из других бассейнов, равно как и нет переброски стока из бассейна р. Селенги в другие бассейны; 2. Отсутствует переток подземных вод между бассейном р. Селенги и смежными речными бассейнами; 3. Суммарные запасы воды (поверхностные, подземные, а также вода, содержащаяся в биосфере) в бассейне р. Селенги величина постоянная.

Бассейн р. Селенги, расположенный на территории Монголии и России, характеризуется высокой степенью неравномерности гидрометеорологической информации, доступной для проведения анализа составляющих водного баланса (Sinyukovich, 2007). Наблюдательная сеть, как правило, приурочена к немногочисленным крупным населенным пунктам, а также сосредоточена в нижней части бассейна. При этом значительная часть территории бассейна относится к горным районам, в которых не осуществляются наблюдения за метеорологическими элементами и речным стоком. Так, по некоторым оценкам, доля площади бассейна Селенги, не охваченной наблюдениями, составляет около 5%. При этом покрытие водосбора сетью метеорологических станций и гидрологических постов явно недостаточно. Так, средняя площадь, охватываемая одной метеостанцией, производящей наблюдения за атмосферными осадками, составляет в бассейне 22000 км<sup>2</sup> при рекомендуемой ВМО площади 9000 км<sup>2</sup> (Sharad&Singh, 2003). Для гидрологических постов наблюдается такая же картина: средний охват одного гидропоста составляет 37 000 км<sup>2</sup> при рекомендуемом значении 10 000 км<sup>2</sup>.

Изучением элементов водного баланса бассейна р. Селенги активно занимаются с 1960-х годов. В настоящее время опубликованы материалы по годовому водному балансу притоков р. Селенги (Афанасьев, 1976; Водные ресурсы..., 1967; Гидрологический режим..., 1977; Ресурсы поверхностных..., 1973; Структура и динамика..., 1987; Sinyukovich, 2008).

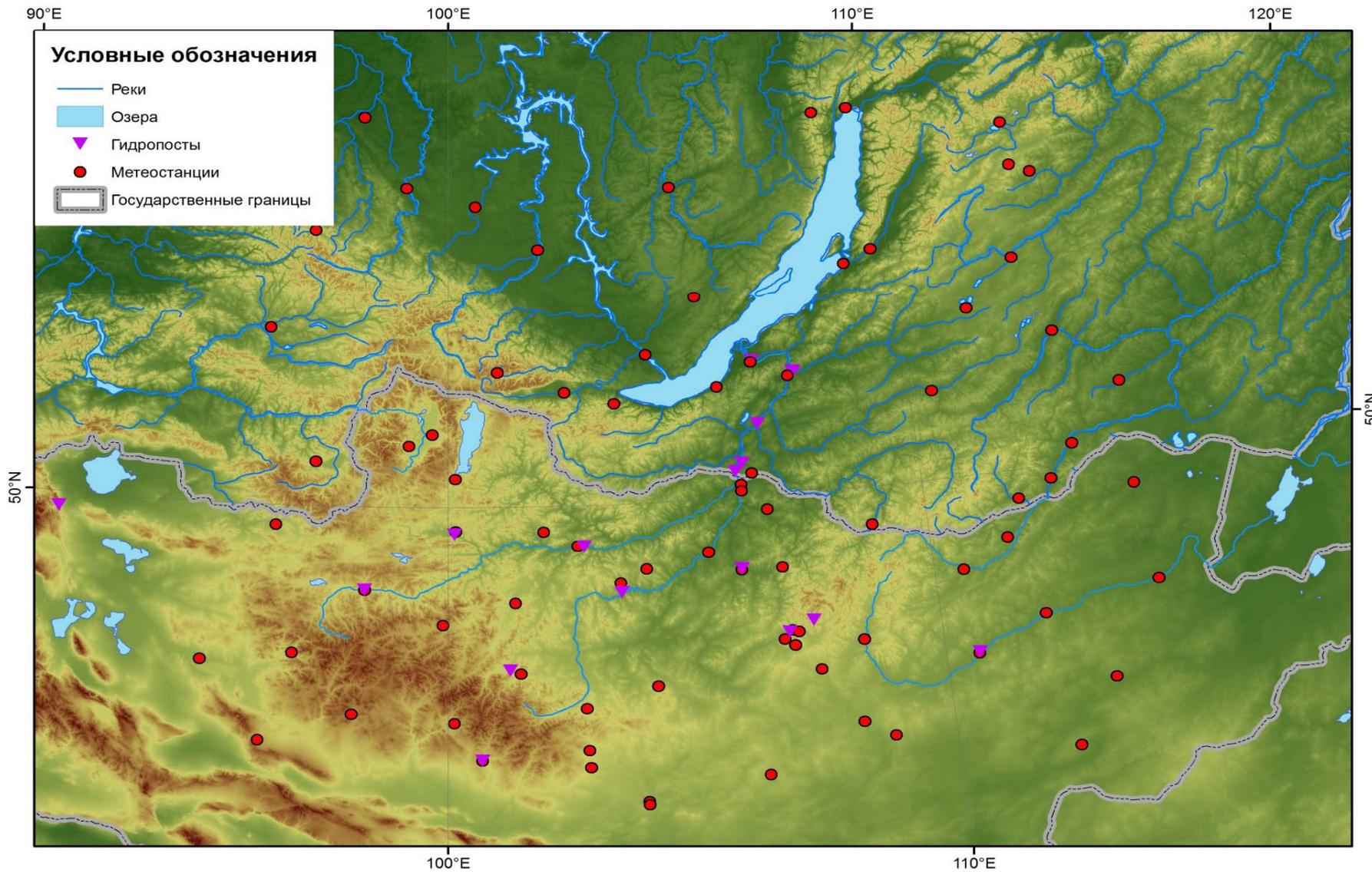


Рисунок 2.1.1 Расположение метеостанций и гидропостов в районе исследования

Оценка приходных составляющих водного баланса осуществлялась по данным многолетних наблюдений за атмосферными осадками на метеорологических станциях в районе бассейна р. Селенга. Расходная часть определялась по данным наблюдений за речным стоком в замыкающих створах, а суммарное испарение определялось как разница между осадками и стоком.

Распределение осадков по территории бассейна р. Селенги соответствует физико-географическому районированию. Вся южная часть водосбора, приуроченная к зоне Центральноазиатских пустынь, характеризуется низкими годовыми суммами осадков, от 80 до 200 мм/год (рис. 2.1.2). Одновременно, это наиболее засушливая часть водосбора, с самыми высокими (до 2°C) среднегодовыми температурами воздуха (рис. 2.1.3), и самой высокой среднегодовой испаряемостью (до 800 мм).

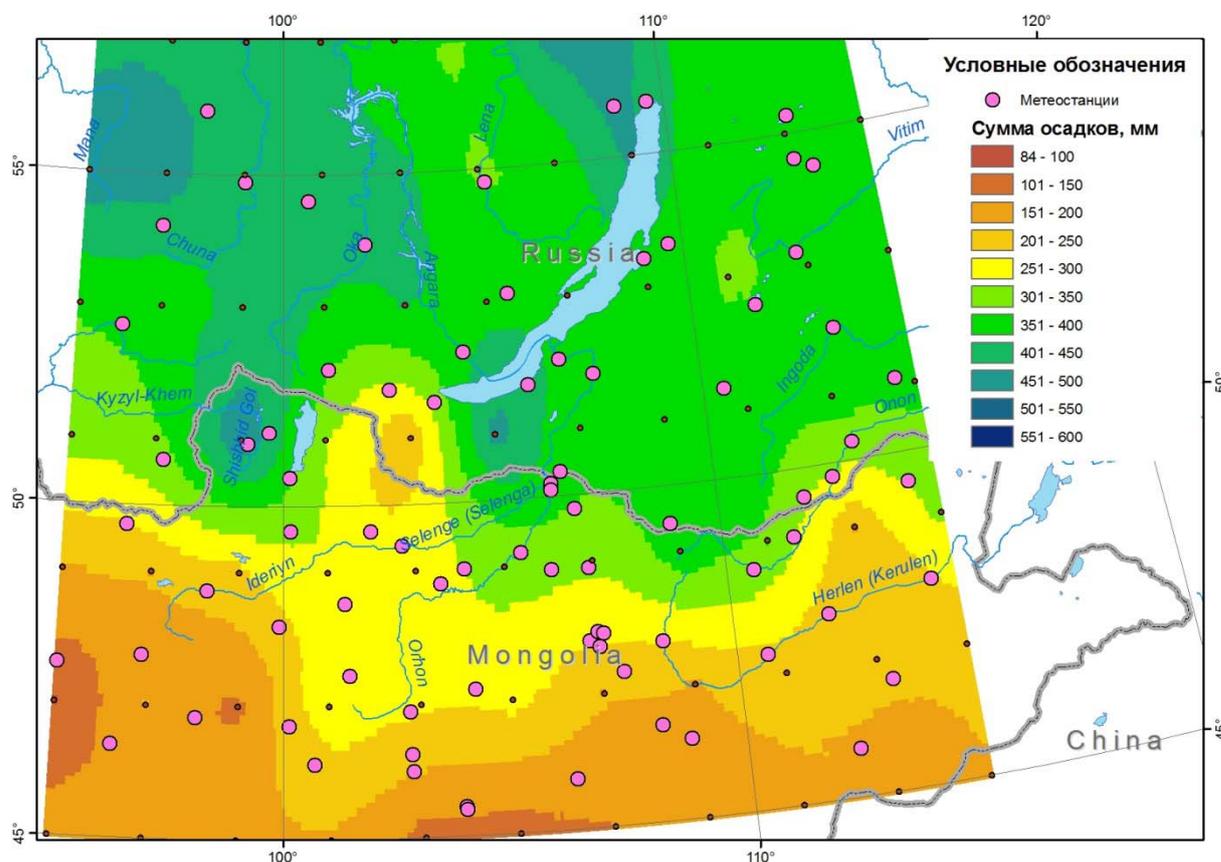


Рисунок 2.1.2 Средняя многолетняя среднегодовая сумма осадков, мм

Расположенная следом на север зона южно-сибирских гор получает от 250 до 400 мм/год. Наконец, самая северная часть бассейна, расположенная в Байкало-Джугджурской горно-таежной зоне, характеризуется самыми высокими в бассейне годовыми суммами осадков – до 500 мм/год.

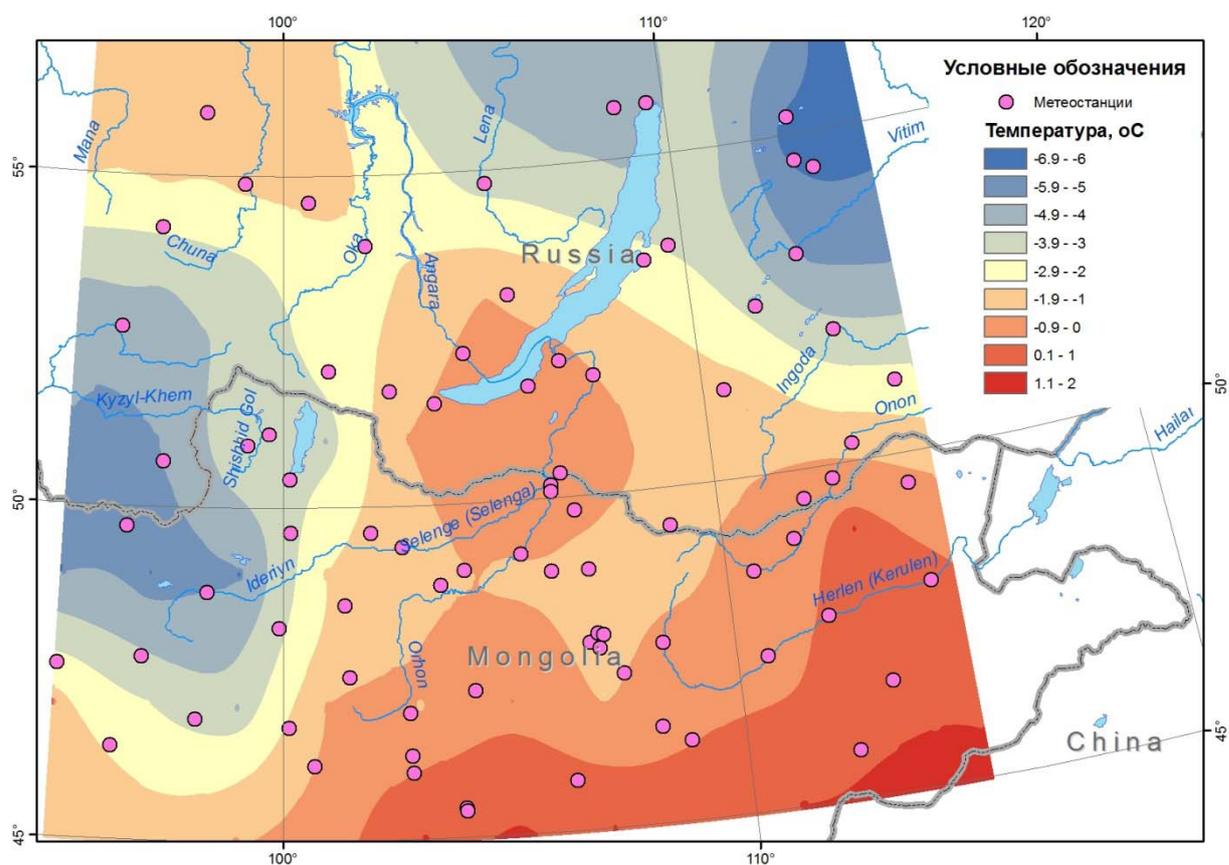


Рисунок 2.1.3 Средняя многолетняя среднегодовая температура воздуха, °С

Согласно работе (Sinyukovich, 2008), в целом по бассейну годовая сумма осадков составляет 321 мм, годовой сток в озеро Байкал – 68 мм, а годовая величина испарения – 253 мм. Авторами были проведены расчеты по базе данных FAO и получено подтверждение этих величин, с незначительными (менее 1%) отклонениями. Так, по расчетам, сумма осадков составляет 317 мм, слой стока в замыкающем створе р. Селенга – с. Кабанск 66 мм, испарение – 251 мм.

Таблица 2.1.1

Среднемноголетние характеристики водного баланса бассейна р. Селенга по данным (Sinyukovich, 2008)

Река - пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Элементы водного баланса, мм		
		осадки	сток	испарение
Селенга - российская часть бассейна	148 333	460	118	342
Селенга в пределах Монголии	282 000	248	42	206
Вся изученная территория	430 333	321	68	253

Во внутригодовом ходе атмосферных осадков выделяется теплый период с апреля по сентябрь, за который в среднем по территории выпадает до 80% осадков (табл. 2). За этот же период через замыкающий створ р. Селенга – с. Кабанск также проходит до 80% годового стока.

Таблица 2.1.2

Характеристика внутригодового хода элементов водного баланса района бассейна р.

Селенга (Grieser et al., 2006)

Элемент	I	II	III	IV	V	VI	
Температура, °С	-22.9	-19.9	-10.3	0.1	8.3	14.5	
Осадки, мм	5.0	4.2	4.8	11.3	23.1	51.3	
Испаряемость, мм	2.5	4.7	20.2	55.5	100	115	
Слой стока р. Селенга – с. Кабанск, мм	10.8	70.6	70.8	35.0	96.9	97.2	

В настоящее время в данном районе отмечается тенденция к уменьшению годовых региональных сумм осадков. Так, за весь период наблюдений отмечен среднегодовой тренд уменьшения осадков до 2,5 мм/год для м/с Кабанск, что соответствует величине изменений около 50 мм за весь 106-летний период наблюдений (Sinyukovich, 2008). Подобные данные по монгольской части водосбора отсутствуют. Среднее количество осадков для исследуемого бассейна составляет 321 мм. В России их выпадает в 1,9 раза больше, чем в Монголии: 460 против 248 мм. Больше всего осадков выпадает в бассейне р. Большая – 600 мм. Она протекает на северо-западе российской части бассейна р. Селенги. Ее водосбор ближе всего расположен к оз. Байкал. Кроме того, значительная часть ее водосбора расположена в горах. Меньше всего в российской части бассейна осадков выпадает в бассейне р. Куйтунка – 330 мм. Несмотря на то, что он расположен менее чем в 100 км от бассейна р. Большая количество осадков в нем почти в два раза меньше. Скорее всего это объясняется расположением его на равнинной территории, окруженной со всех сторон горными хребтами, перехватывающими влагу. На территории Монголии осадков выпадает еще меньше: от 242 до 253 мм.

Средний слой испарения для бассейна р. Селенги составляет 253 мм. В российской части оно несколько выше и составляет 342 мм, а в монгольской – 206 мм. Большее испарение в российской части бассейна объясняется большим количеством влаги. В отличие от осадков слой испарения с российской части бассейна превышает аналогичный показатель с монгольской части в 1,7, а не в 1,9 раза, что связано с увеличением испаряемости с продвижением на юг.

Анализ многолетних изменений объема речного стока показывает наличие нескольких периодов понижения среднегодовой водности р. Селенга в нижнем течении (г/п Кабанск) на фоне общего роста объемов стока (рис. 2.1.4). При этом минимальный годовой сток имеет тенденцию к росту, о чем свидетельствует ряд минимальных в году месячных расходов воды (рис. 2.1.5). За период с 1971 по 1997 годы минимальный в году расход воды р. Селенга вырос более чем в 3 раза. В дальнейшем предполагается сопоставить рост минимальных расходов воды с ростом количества зимних осадков, однако, в настоящий момент времени это не представляется возможным по причине отсутствия ежегодных данных о месячных суммах осадков.

Водный баланс бассейна р. Селенга характеризуется существенной неравномерностью приходных составляющих по территории. Аридный климат южной части водосбора, в пределах которой осадки минимальны, а испаряемость наиболее велика, обуславливает недостаток водных ресурсов. При наличии тенденции к уменьшению количества атмосферных осадков и увеличению температуры воздуха, эта территория становится все более уязвимой с точки зрения водообеспеченности населения и хозяйства возобновляемыми водными ресурсами. Средние многолетние расходы воды р. Селенги уменьшаются в среднем на  $0,7 \text{ м}^3/\text{с}$  в год. Годовой объем стока р. Селенги составляет  $29,2 \text{ км}^3$ , что соответствует среднему многолетнему слою стока 65 мм. Еще большие изменения могут быть прослежены для различных участков бассейна р. Селенги. Средний годовой объем стока р. Уды составляет  $2,1 \text{ км}^3$ . Это соответствует среднему многолетнему слою стока 61 мм.

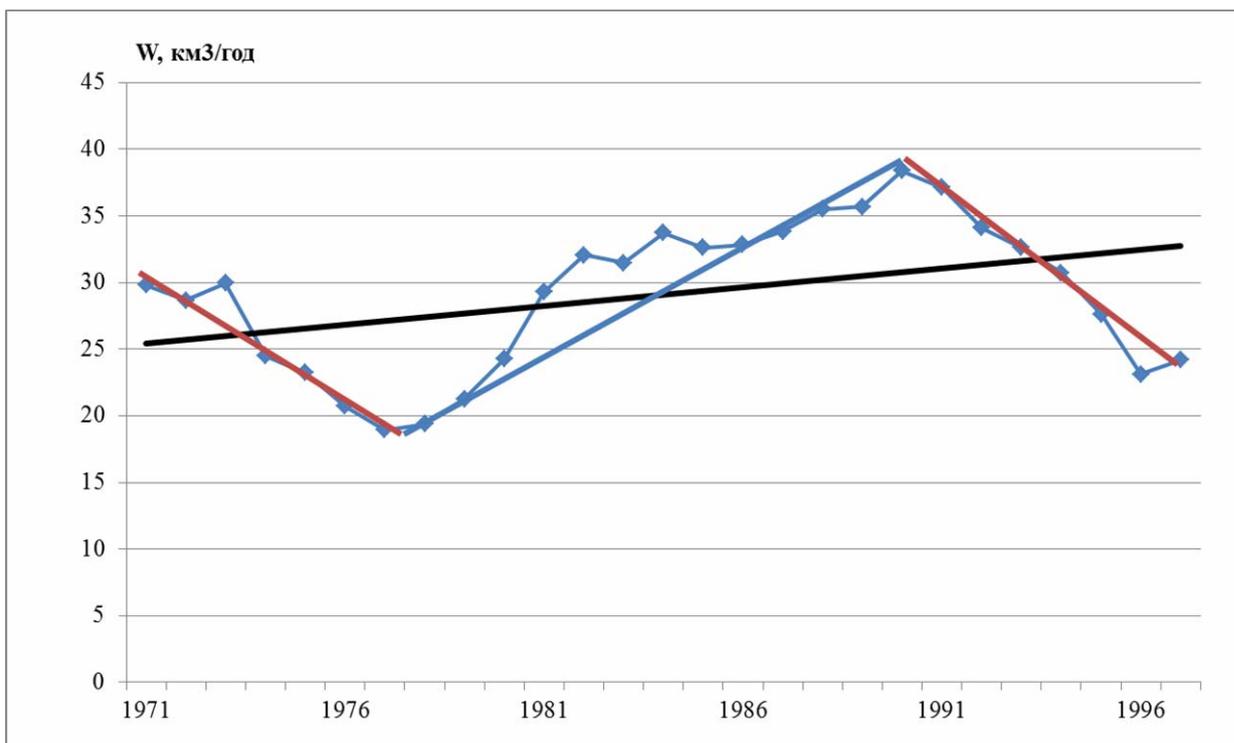


Рисунок 2.1.4 Изменения объема стока р. Селенги на г/п Кабанск за период с 1971 по 1997 гг. Линиями показаны направления трендов

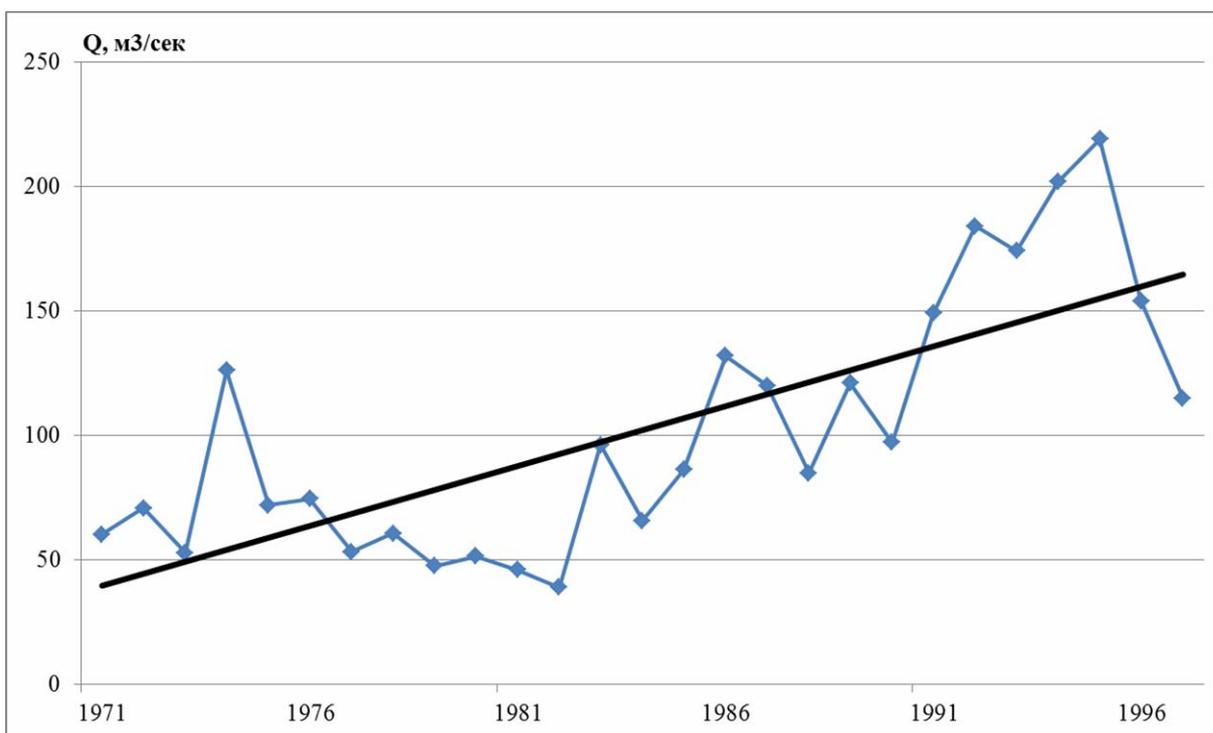


Рисунок 2.1.5 Минимальные в году расходы воды р. Селенги на г/п Кабанск

## 2.2 Современные оценки транспорта загрязнителей реками бассейна Селенги

К настоящему моменту исследования по оценке перемещения загрязнителей проводились для верхнего участка модели, которая целиком включает участок р. Туул. В качестве входных гидрологических данных задавались граничные условия для квази-неустановившегося движения. Для верхнего створа в качестве граничного условия использовался гидрограф за свободный ото льда период 2011 года по посту р. Туул – г. Улан-Батор (рис. 2.2.8). По литературным данным (Battluga et al., 2009; Кузнецов, 1959) известно, что средний расход в Улан-Баторе равен расходу воды в районе верхней границы модельного участка, что позволяет нам использовать данные с гидрологического поста в г. Улан-Батор, как входную гидрологическую информацию.

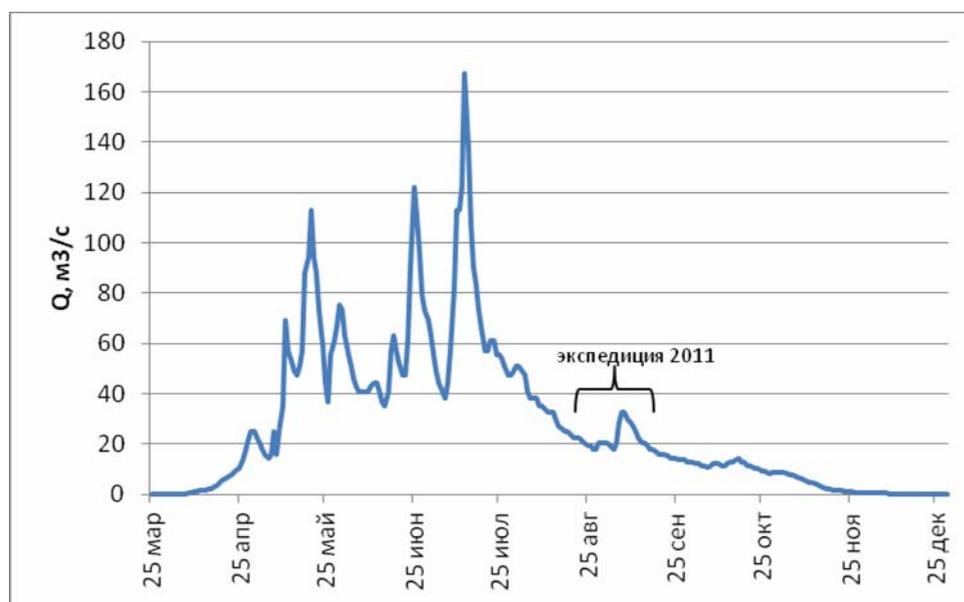


Рисунок 2.2.8 Гидрограф за период открытой воды 2011 г., р. Туул – г. Улан-Батор

Так как отметки водной поверхности на границах неизвестны, для нижнего створа был выбран такой тип граничных условий, как 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.

Также в модель были введены дополнительные граничные условия, для учета влияния золотодобычи в пределах месторождения «Заамар». В программе ArcGIS были оцифрованы площади разработок, всего было определено 5 участков (табл. 2.2.1).

Таблица 2.2.1

### Оценка площади участков разработок на месторождении «Заамар»

Номер участка	Площадь, м <sup>2</sup>	Номер поперечного профиля
1	11 876 071	192-179
2	26 245 121	177-163
3	702 516	152-146
4	28 395 977	144-122
5	673 518	121-120

Для расчёта воздействия разработок были использованы данные об ежедневных осадках в 2011 год (мм). Ежедневный сток с площади каждого участка рассчитывался, как произведение слоя осадков на площадь, деленное на число секунд в сутках. Полученные данные были добавлены в граничные условия, как равномерный боковой приток: каждое значение было отнесено не к одному поперечному профилю, а к площади между двумя поперечниками, таким образом, привнос с разработок носит не точечный, а диффузный характер.

Далее в модель вводились характеристики наносов. Было введено шесть граничных условий в виде серий расходов наносов. Из различных литературных источников (Кузнецов, 1959; Гидрологический режим..., 1977) были собраны имеющиеся данные об одновременно измеренных расходах воды и наносов для того чтобы построить связь  $R = f(Q)$  для пересчёта имеющихся данных по расходам воды в серию расходов наносов. Полученная серия расходов была задана как граничное условие на верхнем створе.

Пяти условиям для квази-неустановившегося движения воды на границах участков разработок также было дано соответствующее количество смываемого материала в тоннах. Количество материала, который поступает в Туул с участков разработок, зависит от интенсивности осадков. В зависимости от количества выпавших осадков брались различные величины скорости эрозии (т/км<sup>2</sup>·день). Затем путем умножения этих величин на площади участков определялась величина смываемого с разработок материала.

Гранулометрический состав наносов был получен в ходе экспедиционных исследований. Так как программа позволяет ввести лишь одну классификацию, то вводимая шкала включала широкий диапазон размеров частиц (табл.2.2.2), что было вызвано необходимостью учесть и размер донных отложений, которые слагают русло реки и размер частиц, которые поступают с участков разработок. Для оценки гранулометрического состава на территории разработок использовались результаты, полученные на нижней границе разработок.

Таблица 2.2.2

Классификация гранулометрического состава, используемая в модели

Участок	Минимальный	Максимальный
---------	-------------	--------------

	размер, мм	размер, мм
Разработки	0.0001	0.001
	0.001	0.005
	0.005	0.0625
Речное русло	0.0625	0.25
	0.25	0.5
	0.5	1
	1	2
	2	3
	3	5
	5	7
	7	10
	10	20
	20	150

### Калибровка и верификация модели

Для оценки адекватности модели, были проведены сценарные расчеты для различных по водности периодов. Из гидрографа, вводимого как граничное условие на верхнем створе, были выбраны два интервала времени, соответствующие условиям водного режима двух экспедиций. Т.е. был выбран отрезок времени прохождения паводка и установления устойчивой межени. Для каждого расчётного периода вычисления производились с учётом разработок и без учёта. Для калибровки были использованы данные по расходам воды и наносов, полученные в ходе экспедиции 2011 и 2012 гг. (табл. 2.2.3).

Таблица 2.2.3

Данные, используемые для калибровки модели для р. Туул

Название точки (см. рис. 1.2.7)	Описание	Параметр	Год, за который использовались данные
T5	20 км выше Заамара	$Q$ , м <sup>3</sup> /с, $R$ , т/сут	2011, 2012
T5a	выше Заамара		2012
T5b	Заамар (мост)		2012
T6	ниже Заамар		2011, 2012
T6a	10 км ниже Заамар		2012
T7	выше впадения в Орхон		2011, 2012

Для условий паводков и межени расчёты проводились с применением различных формул, это позволило выбрать наиболее приемлемый алгоритм (табл. 2.2.4). Полученные значения проверялись по створу, расположенному ниже разработок (Т6). Как видно из таблицы, наиболее точными оказались методы Тофалетти, Уилкока и Акерс-Уайта.

Учитывая рекомендации разработчиков, для расчётов далее использовалась формула Тофалетти.

Таблица 2.2.4

Сравнение различных расчётных формул для расчёта суточного стока наносов с измеренным значением (сценарий паводка)

Расчетная формула		Створ ниже разработок (Т6)		Ошибка, %
		R, т/сут (модель)	R, т/сут (измеренный)	
Акерс-Уайт	Ackers-White	720	710	-1.43
Мейер-Питер	Meyer-Peter Muller	741		-4.24
Лаурсен	Laursen	870		-18.4
Тофалетти	Toffaleti	703		1.01
Янг	Yang	804		-11.7
Уилкок	Wilcock	701		1.26
Ингланд-Хансен	England-Hansen	1095		-35.2

Аналогичные расчёты проводились для сценария, где интерпретируется сток наносов в меженный период (табл. 2.2.5). Для данного сценария методика Тофалетти дает большие ошибки. Наилучшие результаты дает формула Ингланда-Хансена. Исходя из описания указанных методик (User's Manual..., 1995), метод Тофалетти лучше подходит для полноводных рек (с большими глубинами и большей шириной русла) что приводит к тому, что данная формула больше подходит для паводочного периода на реке. Оба эти метода предназначены для широкого диапазона размера частиц, что в случае с созданием модельного участка на р.Туул является большим преимуществом, так как необходимо учитывать особенность перемещения наносов как в русле, так и поступающих с территории разработок.

Таблица 2.2.5

Сравнение различных расчётных формул для расчёта суточного стока наносов с измеренным значением (сценарий межени)

Расчетная формула		Створ ниже разработок (Т6)		Ошибка, %
		R, т/сут (модель)	R, т/сут (измеренный)	
Акерс-Уайт	Ackers-White	54.40	143	163
Мейер-Питер	Meyer-Peter Muller	67.26		113
Лаурсен	Laursen	246.06		-41.7
Тофалетти	Toffaleti	54.40		164
Янг	Yang	78.89		81.8
Уилкок	Wilcock	36.58		292

Энгланд-Хансен	England-Hansen	119.96		19.5
----------------	----------------	--------	--	------

Далее выполнялись расчёты с использованием выбранных методик. Результаты, полученные для паводочного периода без учёта влияния разработок (Сценарий 1), представлены в Таблице 2.2.6.

Таблица 2.2.6

Результаты расчётов стока наносов для паводочного периода  
 (Сценарий 1 – без учёта влияния разработок)

Номер точки	Q, м <sup>3</sup> /с	R, т/сут	Q, м <sup>3</sup> /с	R, т/сут	Ошибка, %
	измеренный		модель		
T5	33.5	307.5	33.2	304.0	1.15
T6	28.0	710		99.07	86.1
T7	29.3	456		87.46	80.8

Как видно, относительно небольшая погрешность была получена лишь для точки, которая расположена выше разработок. Далее результаты дали большие ошибки, что говорит о большом вкладе в сток наносов результатов антропогенной деятельности в районе Заамара. Такие ошибки связаны с тем, что кроме поступлений с участков разработки золота в модели не учтен бассейновый вклад в сток наносов, а во время паводков локальные источники поступления наносов с водосбора играют существенную роль.

После добавления в модель граничных условий, учитывающих влияние разработок (Сценарий 2), были получены следующие результаты (табл. 2.2.7). Учитывалось продольное увеличение стока наносов по длине р. Туул в районе разработок.

Таблица 2.2.7

Результаты расчётов стока наносов для паводочного периода  
 (Сценарий 2 – с учётом влияния разработок)

Номер точки	Q, м <sup>3</sup> /с	R, т/сут	Q, м <sup>3</sup> /с	R, т/сут	Ошибка, %
	измеренный		модель		
T5	33.5	307.5	33.2	303.9	1.16
T6	28.0	710		702.9	1.00
T7	29.3	456		683.3	-49.9

В результате расчётный расход наносов на створе T6, расположенном на выходе реки с территории разработок, отличался от фактического на 1%, ниже по течению ошибка возрастала до 50%. В замыкающем створе ошибка достаточно велика, что может

быть связано с неточностью заданной геометрии русла. Однако несмотря на достаточную большую ошибку, в целом модель дает адекватные результаты.

Для меженного периода был проведен один расчёт, без добавления условий разработок. Так как в исследуемый период осадков не наблюдалось, и разработки, таким образом, не оказывали воздействия на сток наносов. Как видно из таблицы 2.2.8 расчётные расходы наносов дали относительно небольшие погрешности в пределах 30 %.

Таблица 2.2.8

Результаты расчёта стока наносов для меженного периода

Номер точки	измеренный	Сценарий 1	
	R, т/сут	R, т/сут	Ошибка, %
T5	134	98.0	27
T5a	110	144.4	-31
T5b	81.87	69.0	16
T6	143.4	120.0	16
T6a	119	164.0	-38
T7	87	98.0	-13

#### Пространственно-временные особенности стока наносов р. Туул

Ниже представлены схемы изменения стока наносов вдоль модельного участка р. Туул (рис. 2.2.9, 2.2.10). Рисунок 2.2.9 составлен по результатам Сценария 2 для условий паводков. Сток наносов изменялся по длине модельного участка от 110 до 1200 т/сутки. Максимальные значения были вычислены на створах сразу после разработок, минимальные-на входе, таким образом, изменение стока наносов по длине реки соответствует измеренному продольному изменению стока наносов, полученному в ходе полевых экспедиций, что подтверждает высокую воспроизводимость результатов моделирования.

Для межени расходы наносов изменялись от 47 до 785 т/сут. В этом случае продольное изменение расхода наносов носит более непостоянный характер. Дисперсия полученных результатов связана с изменением гидравлических и морфометрических характеристик русла: наименьшие результаты получены на участках с минимальными уклонами, где транспортирующая способность потока снижалась, а наибольшие – там, где энергия потока увеличивалась в связи с увеличением уклонов или благодаря сужению речного русла.

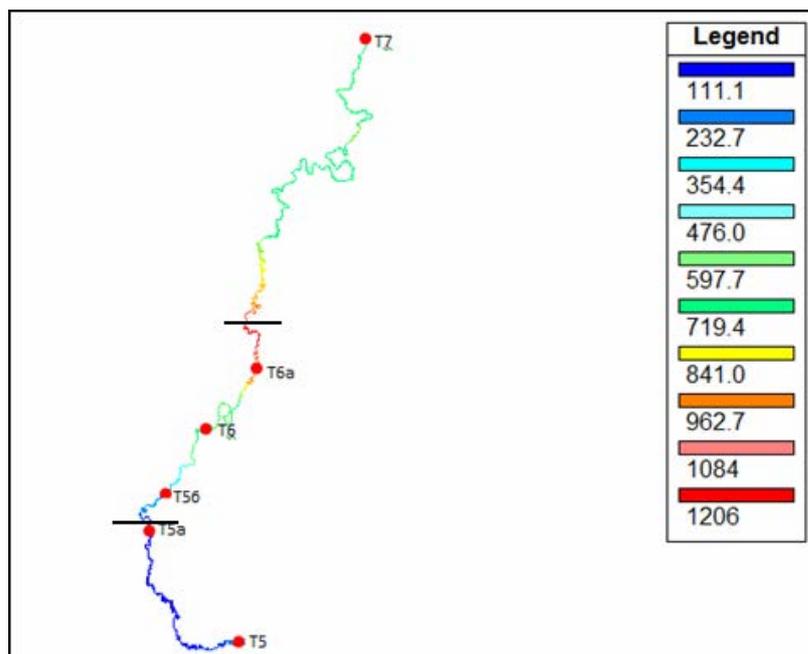


Рисунок 2.2.9 Продольное изменение стока наносов для паводочных условий (Сценарий 2, с учётом разработок). Чёрными линиями обозначены границы месторождения «Заамар» (течение снизу вверх)

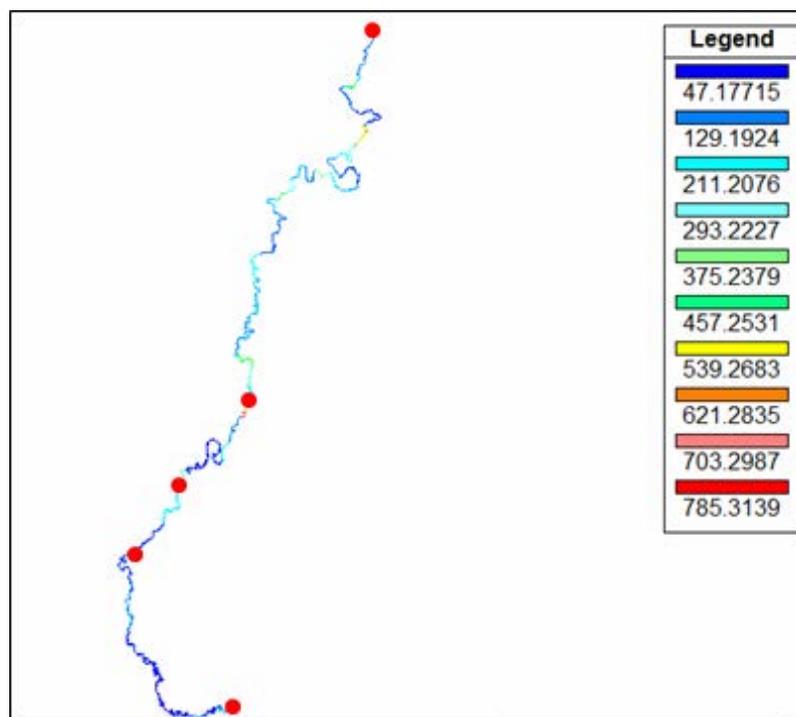


Рисунок 2.2.10 Продольное изменение стока наносов для межениных условий (течение снизу вверх)

## Заклучение

Настоящий отчет посвящен описанию и промежуточным результатам разработки системы моделирования водного баланса и транспорта загрязнителей в бассейне р. Селенга на основе существующих программных комплексов разного целевого назначения (HEC-RAS, WEAP, NewLocclim и ECOMAG) и разрабатываемой экспертно-аналитической системы дальности распространения загрязнителей.

В зависимости от объема требуемой исходной информации и задач тех или иных программных средств выделено 3 пространственных масштаба реализации моделей: бассейновый (региональные гидроклиматические модели и бассейновые модели формирования стока); подбассейновый – масштаб наиболее освоенных в хозяйственном отношении частей бассейна (водохозяйственные экспертно-аналитические модели); русловой (гидродинамическое моделирование транспорта загрязнителей).

В отчете показаны промежуточные результаты внедрения системы HEC-RAS для речной системы Туул-Орхон. На данном этапе завершено создание входной информации по длине модельных участков, проведены сценарные расчеты массопереноса ниже крупнейшей разработки золота в бассейне Селенги – месторождения Заамар.

Рассмотрены принципиальные подходы к моделированию водного баланса бассейна р. Селенга: пространственно-распределенные модели гидрологического цикла и формирования стока; водохозяйственные экспертно-аналитические модели; региональные гидроклиматические модели. Реализация гидроклиматической модели NewLocclim для бассейна Селенги показала, что при наличии тенденции к уменьшению количества атмосферных осадков и увеличению температуры воздуха, эта территория становится все более уязвимой с точки зрения водообеспеченности населения и хозяйства возобновляемыми водными ресурсами. Средние многолетние расходы воды р. Селенги уменьшаются в среднем на  $0,7 \text{ м}^3/\text{с}$  в год.

Оценена применимость воднобалансовых моделей для использования при оценке последствий реализации водохозяйственных мероприятий в бассейне Селенги на изменение водного режима рек. Показано, что наиболее простым способом является внедрение водохозяйственной экспертно-аналитической системы типа WEAP, которая может быть рекомендована проекту ПРООН-ГЭФ как основа для целевого НИР. В то же время существующие наработки в области гидроклиматического могут относительно просто быть адаптированы для сценарных расчетов реакции речной системы на изменения природно-техногенной обстановки в бассейне.

На долгосрочную перспективу актуальным является создание пространственно-распределенной модели гидрологического цикла и формирования стока. Учитывая, что в Российской Федерации для большинства водохозяйственных округов завершена подготовка модели ECOMAG, задача ее запуска для бассейна Селенги также представляется реальной. Возможность получения расчетных гидрографов стока в приустьевых створах, так и в промежуточных пунктах наблюдений, позволит выполнить наиболее детализированную оценку изменения водного стока рек бассейна Селенги.

## Литература

Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал, Новосибирск: Наука, 1976.

Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л.: ГМИ, 1967.

Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета. Л.: Гидрометеиздат, 1977.

Исследование, прогноз пространственного распределения характеристик водного стока бассейна трансграничных рек Селенга и Чикой и разработка рекомендаций по предотвращению вредного воздействия вод. //Отчет по 1 этапу государственный контракта № И-12-71. Отв. исп. Е.Ж. Гармаев, Улан-Удэ, БИП СО РАН, 2012

Кузнецов Н.Т. Гидрография рек Монгольской Народной Республики. М.: Изд-во АН СССР, 1959.

Кузнецов Н.Т. Основные закономерности режима рек Монгольской Народной Республики. М.: изд-во АН СССР, 1955.

Мотовилов Ю.Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов. М.: РАН, 1993. С. 9–37.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: ГМИ, 1973. Т. 16. Вып. 3.

Структура и динамика речного стока горных регионов, Новосибирск: Наука, 1987.

Battulga P., Dae P. Y., Senjim B. & Tsagaantsooj N. The impact of forest degradation in Tuul river basin's surface water resources. IHP VII Technical Documents in Hydrology, No. 1, UNESCO Office, Beijing, PRC, 2009.

Bergström S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Swedish Meteorological and Hydrological Institute RHO Report 7. Norrköping, 1976.

Gibson S., Brunner G., Piper S. & Jensen M. Sediment Transport Computation with HECRAS. Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nevada, USA, 2006.

Grieser J., Gomme R., Bernardi M. New LocClim - the Local Climate Estimator of FAO. European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 08305, 2006.

Kratz D.A., Ibisch R.B., S. Avylush, et al. Impacts of Open Placer Gold Mining on Aquatic Communities in Rivers of Khentii Mountains, North-East Mongolia // Mongolian Journal of Biological Sciences, 2010, Vol. 8 (1): 41–50.

Malsy, M.; Heinen, M.; aus der Beek, T.; and Flörke, M. (2013): Water resources and socioeconomic development in a water scarce region on the example of Mongolia. Geo-Öko, 34. (in press)

Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1999a. №98–99. P. 257–277.

Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A.. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105. May 1999b. 88 p.

Motovilov Yu.G., Vehvilainen B.. Snow cover and snowmelt runoff model in the forest zone. // Proc. Intern. Soviet-Finnish Symp. in Water Research in Moscow, 1986. VYH monistesarja Nro 27. Helsinki, 1987. P. 84–100.

Sharad K. Jain, V.P. Singh, *Water Resources Systems Planning and Management*. Elsevier Science B.V., 2003.

Sinyukovich V.N., *The water balance of the Selenga river basin*, 2007.

Sinyukovich V.N. The water balance of the Selenga river basin. *Geography and Natural Resources* 29, 2008. P. 54–56.

Vehvilainen B., Motovilov Yu.G. Simulation of soil frost depth and effect on runoff // *Nordic Hydrology*. 1989. Vol. 20. P. 9–24.

Verzano, K. (2009): Climate change impacts on flood related hydrological processes: Further development and application of a global scale hydrological model, reports on Earth System Science, 71-2009, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 166 pp., available at: <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/WEBBzE71verzano.pdf>

USACE HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. Ver. 4.1 – U.S. Army Corps of Engineers Center, Davis, California, USA, 2010.

U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC), HEC-RAS. User's Manual. Davis, CA, 1995.

Yosida Z. Physical studies on deposited snow. *Contrib. Inst. Low Temp. Sci. Sapporo*, 1955. №7. P. 19–74.