

На правах рукописи

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра
Великого», Инженерно-строительный институт, Высшая школа
гидротехнического и энергетического строительства

Никоноров Александр Олегович

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ
СИСТЕМ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ САМОРЕГУЛИРУЕМЫХ
ГИДРОУЗЛОВ С ВРЕМЕННО-ЗАПОЛНЯЕМЫМИ
ВОДОХРАНИЛИЩАМИ НА РЕЧНОМ БАССЕЙНЕ**

Научный доклад

Направление подготовки

08.06.01 «Техника и технологии строительства»

Направленность

08.06.01_03 «Гидротехническое строительство»

Научный руководитель:

Баденко Владимир Львович, д.т.н.

Санкт-Петербург

2020

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы исследования. В России ежегодно происходит от 40 до 70 крупных наводнений. По данным Росгидромета, этим стихийным бедствиям подвержены около 500 тыс. кв. км, наводнениям с катастрофическими последствиями - 150 тыс. кв. км, где расположены порядка 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельхозугодий [1]. Среднегодовой ущерб от наводнений оценивается примерно в 40 млрд руб. При этом оценка отдельных составляющих социально-экономического ущерба, ввиду их разнородной природы и специфических особенностей, как правило, осуществляется с помощью различных мер количественного и качественного измерения. Ущерб от паводка можно рассматривать как интегральный риск, включающий в себя экономические, социальные и экологические риски [2-4].

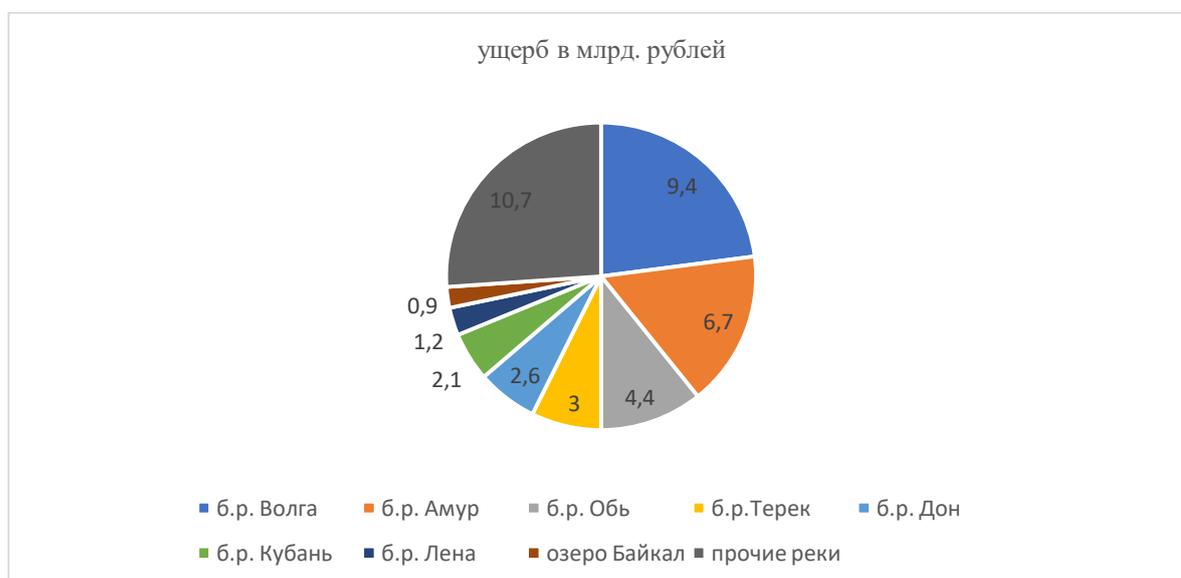


Рисунок 1. Распределение среднегодового ущерба от паводковых наводнений по водным бассейнам.

Согласно исследованиям Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации - Мирового центра данных (ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД"), суммарно число опасных гидрологических явлений (наводнений, паводков и селей) за первое десятилетие XXI в. в России

выросло в 1,5 раза по сравнению с 1990-ми гг. В таблице 1 приведены примеры паводковых наводнений в РФ за последние 7 лет.

Таблица 1. Паводковые ЧС в РФ за последние 7 лет и их последствия.

| Место события | Дата | Последствия |
|---|------------------------|---|
| Геленджик, Новороссийск, Крымск | 6-7 июля 2012 г. | Были подтоплены 7,2 тыс. жилых домов, из них полностью разрушены свыше 1,6 тыс. домовладений. Стихия нарушила системы энерго-, газо- и водоснабжения, автомобильное и железнодорожное движение. Общий ущерб от стихии составил порядка 20 млрд руб. |
| бассейн реки Амур (Амурская область, Хабаровский край и Еврейская автономная область) | июль - октябрь 2013 г. | Были подтоплены 2 крупных города, три районных центра, 90 населенных пунктов, 3500 жилых домов, 35 объектов социального назначения, 74 объекта коммунального хозяйства. 190 тыс. пострадавших. Разрушено 290 км автодорог, пострадали |

| | | |
|-------------------|---------------------------|---|
| | | 20 тыс. га. Общий ущерб превысил 527 млрд. рублей. |
| Приморский край | 31 августа 2016 г. | Были затоплены 170 населенных пунктов, более 15 тыс. домовладений, свыше 21 тыс. земельных участков, тысячи гектаров сельскохозяйственных земель. Было разрушено 549 километров дорог. Пострадали 40 тыс. человек. Ущерб от наводнения составил порядка 7 млрд. рублей. |
| Иркутская область | 25 июня – 02 июля 2019 г. | Подтоплено более 6700 жилых домов. Частично разрушена автомобильная инфраструктура. Предварительный ущерб составляет 31 млрд. рублей. |

Как видно из повторяющегося характера данных явлений, крайне важно принимать меры по своевременному предотвращению и минимизации последствий чрезвычайных ситуаций. Меры защиты от наводнений могут быть **оперативными** (срочными) и **техническими** (предупредительными). К оперативным мерам относятся своевременное прогнозирование

максимальных уровней наводнений, своевременное оповещение о возможных опасных уровнях, организация эвакуации населения и материальных ценностей и др [2].

Обязательным условием организации защиты от поражающих факторов и последствий наводнений является их **прогнозирование** [5-6]. Для прогнозирования используется гидрологический прогноз – научно-обоснованное предсказание развития, характера и масштабов наводнений. В прогнозе указывают примерное время наступления какого-либо элемента ожидаемого режима, например, вскрытия или замерзания реки, ожидаемый максимум половодья, возможную продолжительность стояния высоких уровней воды, вероятность затора льда и другое [7-9]. Прогнозы делятся на краткосрочные – до 10-12 суток и долгосрочные – до 2-3 месяцев и более [10]. Они могут быть локальными (для отдельных участков рек и водоемов) или территориальными, содержащими обобщенные по значительной территории сведения об ожидаемых размерах и сроках явления.

Наиболее распространенной является модель прогнозирования с использованием индекса влажности почвы [11]. Данный метод может применяться в оперативной практике только в тех случаях, когда имеет значение поверхностный сток, и единственно обоснованным является простой подход [4]. Другой метод прогноза паводка – модель «Сакраменто» [5]. Она была разработана в Национальной службе погоды США в Сакраменто, штат Калифорния. Пространственно–сосредоточенная непрерывная модель учета почвенной влаги, идеальная модель для моделирования крупных бассейнов (площадью более 1 000 км²). Модель «Сакраменто» успешно используется в оперативной деятельности Национальной службы погоды США и при моделирование стока с нескольких водосборов, расположенных в Австралии с разной дискретностью. Использование данной модели предусматривает наличие входных параметров, необходимых для компиляции модели, модель рельефа и сведения о доминирующих почвогрунтах [5].

В Краснодарском крае создана и с 2013 г. функционирует система мониторинга паводков, состоящая из 189 автоматических гидрологических комплексов (АГК). С помощью АГК в непрерывном режиме происходят измерения уровней воды на реках. Время работы гидрологического комплекса без заряда АКБ составляет 14 суток. С целью обеспечения единства времени измерений, все автоматические комплексы оборудованы приемниками GPS/ГЛОНАС [6].

Оперативные меры не решают в целом проблему защиты от наводнений и должны осуществляться в комплексе с техническими мерами.

Технические меры носят предупредительный характер, и для их выполнения необходимо заблаговременное строительство специальных инженерных сооружений с расходом значительных материальных и финансовых ресурсов. В комплексе технических мероприятий различают активные и пассивные методы защиты (рис. 2).



Рисунок 2. Технические меры защиты от наводнений.

Выбор способа защиты затопляемых территорий зависит от многих факторов, таких как гидравлический режим водотока, рельеф местности, инженерно-геологические и гидрогеологические условия, наличие инженерных сооружений в русле и на пойме (плотины, водохранилища, мосты, дороги, водозаборы, дамбы), расположения объектов народного хозяйства, которые подвергаются затоплению.

На данный момент исследования по вопросу предотвращения и минимизации последствий паводков также ведутся по направлению моделирования паводковых наводнений, в том числе с применением инженерных решений [12].

Интересным современным методом решения проблемы видится создание распределенной сети саморегулируемых гидроузлов с временно-заполняемыми водохранилищами для минимизации последствий паводковых ситуаций [13-14]. В исследовании [15-19] рассматривается вопрос нахождения параметров системы, включающей гидроузел с гидроэлектростанцией (каскад ГЭС) комплексного назначения (выработка электроэнергии, борьба с наводнениями) на основной реке с минимальными подпорной отметкой и емкостью регулирования максимального стока, разработан алгоритм и программно реализованы математические модели режимов работы русловой ГЭС и противопаводковых гидроузлов на боковых притоках.

Целью исследования являлось совершенствование существующих расчетно-теоретических методик для моделирования и оценки динамики паводковых ситуаций. Новая расчетно-теоретическая методика основана на использовании программных комплексов, включающих гидродинамические модели и географические информационные системы (ГИС), для обоснования и выбора возможных технических противопаводковых мероприятий, предотвращающих ЧС при минимальном воздействии на окружающую среду.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Сравнительный анализ программного обеспечения ГИС для выявления возможностей по подготовке исходных данных для моделирования и представления результатов моделирования для лиц, принимающих решения (ЛПР).
2. Разработка методов экспорта/импорта информации между базами данных (БД) ГИС и системами гидрологического моделирования.

3. Разработка методов анализа полученных результатов гидрологического моделирования для обоснования инженерных мероприятий по защите территорий от наводнений.
4. Разработка методики моделирования гидрологических явлений в среде ГИС.
5. Разработка метода анализа разработанной методики ее верификации и идентификации параметров на основе корреляции фактической картины наводнения и результатов моделирования.
6. Проведения ряда модельных расчетов возможных сценариев развития наводнений чрезвычайного характера, сравнение данных с применением предлагаемого инженерного решения и без;
7. Разработка методики обоснования инженерных решения для предотвращения последствий катастрофических наводнений.

Объектом исследования являются территории бассейнов рек, подверженные влиянию паводковых наводнений с системой распределенных противопаводковых саморегулируемых гидроузлов, местоположение которых и параметры подлежат обоснованному выбору.

Предметом исследования является динамика развития паводковых явлений на объекте исследования.

Методы исследования. Исследование основано на моделировании изменения гидрологических процессов в бассейне реки в среде ГИС при строительстве сети противопаводковых саморегулируемых гидротехнических сооружений и анализ влияния таких изменений на устойчивое эколого-социально-экономическое развитие территории речного бассейна. Для исследования используется следующее: методы гибридного моделирования, включающее физическое и математическое моделирование (в виде геоинформационного моделирования), элементы статистического анализа и теории планирования эксперимента (при сборе исходных данных). Для решения научно-

практических задач адаптируются широко протестированные программные вычислительные комплексы гидрологического моделирования и ГИС.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые в единой среде ГИС интегрируются данные из различных источников, позволяющих моделировать гидрологические явления с учетом многообразного влияние строительства сети гидротехнических сооружений для смягчения влияния наводнений на изменение эколого-социально-экономической ситуации на территории бассейна реки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика моделирования изменения гидрологических процессов в бассейне реки в среде ГИС с учетом природных процессов и гидротехнических сооружений, изменяющих ход этих процессов.
2. Методика обоснования инженерных мероприятий по борьбе с наводнениями путем выбора местоположения сети противопаводковых саморегулируемых гидроузлов (ПСРГ) с временно-заполняемыми водохранилищами на основе моделирования в среде ГИС.
3. Особенности и закономерности влияния строительства ПСРГ на устойчивое эколого-социально-экономическое развитие территории речного бассейна.

Научно-практическая значимость исследования заключается в следующем: в ходе исследования была сформулирована методика моделирования паводковых ситуаций, основанная на использовании программных комплексов на основе ГИС, сформулированы требования по исходным данным и основной алгоритм действий. Результаты исследования показывают, что благодаря создаваемым моделям затопления территорий с применением технических средств защиты (в виде сети ПСРГ и временно-заполняемых водохранилищ) возможно проанализировать как уже случившиеся паводковые наводнения, так и моделировать возможные паводки

заданной обеспеченности (рис. 3). На основе таких моделей возможно принятие управленческих решений касательно проведения противопаводковых мероприятий. Преимуществом предложенной методики является возможность обоснования местоположения предложенных технических мер (системы ПСРГ с определенными параметрами в бассейне реки) с учетом оценки воздействия на экосистемы в бассейне реки.

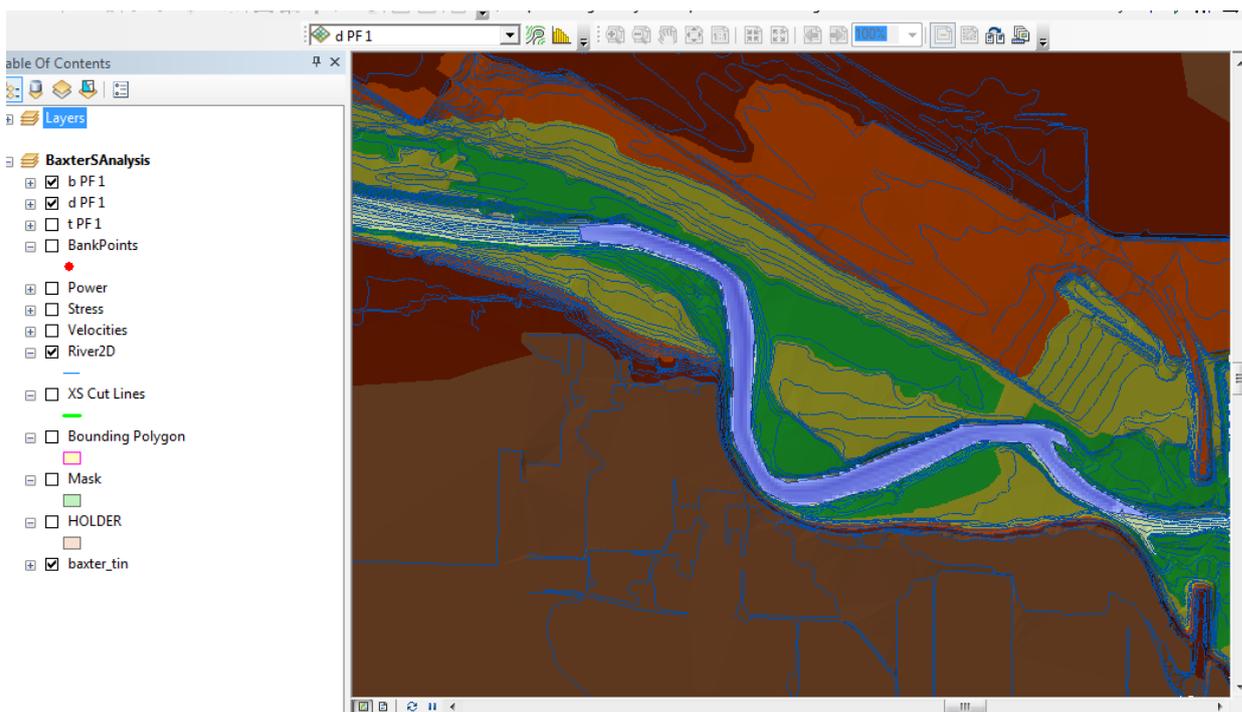


Рисунок 3. Результаты моделирования зоны затопления при отсутствии технических мер.

Апробация. По теме диссертации опубликовано восемь печатных работ, одна из которых - в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК, три - в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Еще одна статья находится на рецензии в издании из перечня рецензируемых научных журналов ВАК.

Работы, опубликованные автором по теме диссертации:

1. Nikonorov A., Badenko V., Terleev V., Togo I., Volkova Yu., Skvortsova O., Nikonova O., Pavlov S., Mirschel W. Use of GIS-environment under the analysis of the managerial solutions for flood events protection measures// Procedia Engineering. — 2016. — №165. — pp. 1731-1740.

2. Badenko V., Badenko N., Nikonorov A., Molodtsov D., Terleev V., Lednova Ju., Maslikov V. Ecological aspect of dam design for flood regulation and sustainable urban development// MATEC Web of Conferences. — 2016. — №2016. — Article number 03003.
3. Никоноров А.О. Анализ использования ГИС-технологий для принятия управленческих решений по борьбе с паводковыми явлениями// Политехническая неделя в Санкт-Петербурге материалы научного форума с международным участием. Кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства. — 2016. — 373-376 с.
4. Nikonorov A., Terleev V., Badenko V., Mirschel W., Abakumov E., Ginevsky R., Lazarev V., Togo I., Volkova Yu., Melnichuk A., Dunaieva I., Akimov L. Modeling the hydrophysical soil properties as a part of selfregulated flood dams projection in GIS-environment for sustainable urban development// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — Article number 012109.
5. Никоноров А.О., Баденко В.Л. Расчетное обоснование систем противопаводковых саморегулируемых гидроузлов на речном бассейне в среде ГИС// Неделя науки 2017: материалы научного форума с международным участием Инженерно-строительный институт. Кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства. Сер. "Неделя науки" — 2017. — 261-265 с.
6. Никоноров А.О., Акимов Л.И. Методологические основы обоснования распределенных на речном бассейне систем противопаводковых гидроузлов// Неделя науки 2017: материалы научного форума с международным участием Инженерно-строительный институт. Кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства. Сер. "Неделя науки" — 2017. — 266-269 с.
7. Никоноров А.О., Гарманов В.В. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в среде ГИС и связанные с ним ограничения// Неделя науки 2017: материалы научного форума с международным участием

Инженерно-строительный институт. Кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства. Сер. "Неделя науки" 2017 — 269-272 с.

8. Никоноров А.О., Баденко В.Л. Оценка динамики паводковых ситуаций на основе моделирования в среде ГИС для обоснования технических мероприятий// Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — 2020. — Т. 294. 75-89 с.

Основное содержание диссертации

1. Теоретические основы моделирования

Разрабатываемый метод предназначен для исследования изменения паводковой ситуации в бассейне реки при различных вариантах расположения ПСРГ с различными параметрами. Это позволит обосновать расположение системы ПСРГ с определенными параметрами в бассейне реки и оценить воздействие ПСРГ на экосистемы в бассейне реки.

Проектирование ПСРГ является многокритериальной задачей, и окончательное решение определяется технологическими, экономическими, экологическими и социальными факторами.

Ранее выполненные исследования показали целесообразность создания водохранилищ в виде временно заполняемых саморегулируемых емкостей [13, 17]. Водопропускное сооружение гидроузла выполняется с нерегулируемым водосбросом без использования затворов, что повышает надежность работы и удешевляет обслуживание. В период аккумулярования паводковых расходов ложе такого водохранилища затапливается кратковременно, а после самоопорожнения до следующего паводка остается в естественном состоянии.

Блок-схема метода представлена на рисунке 4.

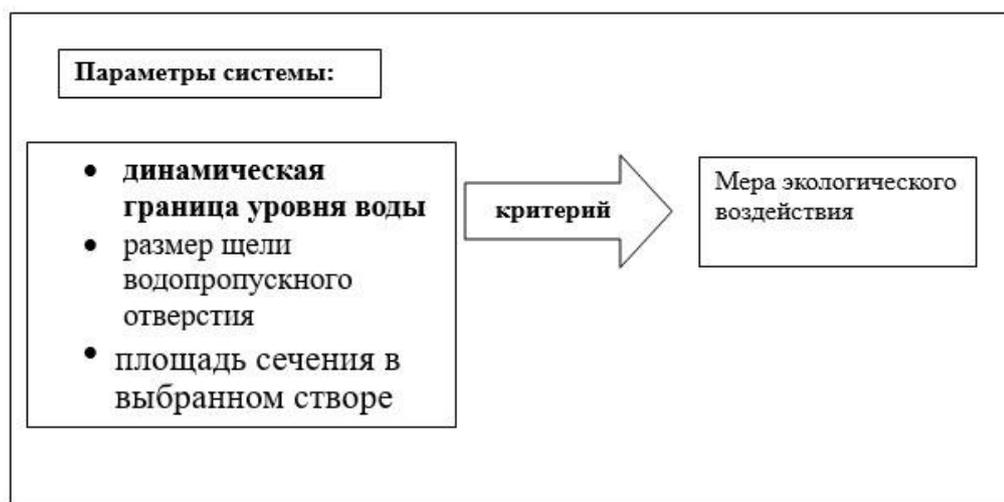


Рисунок 4. Блок-схема метода.

Основным рассматриваемым параметром является динамическая граница уровня воды (территории, покрытой водой), – именно с этой целью

необходимо использование ГИС. Получая данные о динамической границе уровня воды, можно определить, какие экосистемы (или их части) и какое время находятся под водой, в соответствии с этим возможно выбрать местоположение предполагаемой сети сооружений на водотоке. Остальные параметры (размер щели водопропускного отверстия, а также площадь сечения в выбранном местоположении) задаются в упрощенном виде, их расчет не рассматривается. Основным критерием при выборе (сравнении) местоположения ПСРГ является мера экологического воздействия – что затопляется на территории временно-заполняемого водохранилища и на какой срок.

Для каждого населенного пункта, располагающегося вблизи водного объекта, существуют так называемые критические значения уровня воды, опасные и особо опасные отметки. Опасная отметка H_{d1} — значение уровня воды, при превышении которого начинается затопление поймы, сельскохозяйственных угодий. Особо опасная отметка — значение уровня воды H_{kr1} (индивидуальная для каждого объекта), при превышении которого начинается подтопление прибрежных населенных пунктов, хозяйственных объектов, дорог, линий связи и электропередачи и др.

Паводком считается кратковременный (Δt), интенсивный подъем (рис.5) уровня воды, вызванный дождями и ливнями, иногда таянием снега при зимних оттепелях, ураганом или очень быстрым таянием снега в горах и т.д. Паводки не имеют сезонного характера и случаются в любое время года.

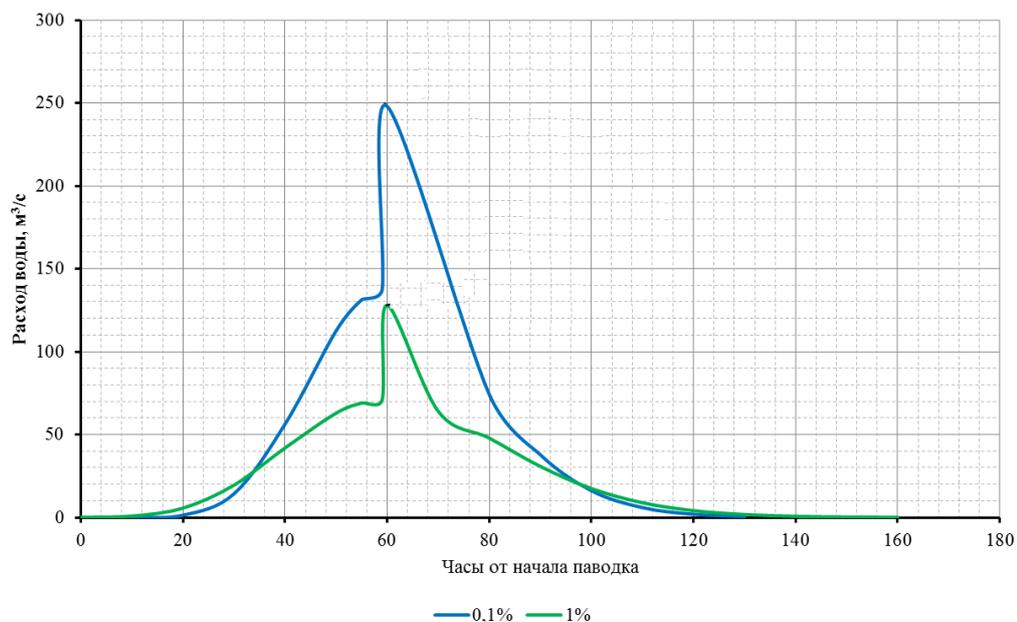


Рисунок 5. Возможная форма паводкового гидрографа.

В период половодий и паводков уровень воды в реках достигает наивысшего значения, который называется H_{\max} максимальным уровнем воды в период половодья или паводка. Данные о H_{\max} и максимальных расходах воды (Q_{\max}) необходимы при изучении наводнений и организации противопаводковых мероприятий. Данные о H_{\max} и Q_{\max} используются при проектировании строительства гидротехнических сооружений, а также жилых и хозяйственных объектов, расположенных в прибрежной зоне. При этом проектирование защитных сооружений ведется с учетом предельного уровня воды H_{\max} в нижнем бьефе и расхода притока воды определенной повторяемости (обеспеченности), определяемой в соответствии с классом гидротехнического сооружения, в соответствии с СП 58.13330.2012.

Согласно требованиям пункта 4 СП 104.13330.2016 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления» - система инженерной защиты от подтопления должна быть территориально единой, объединяющей все локальные системы отдельных участков и объектов, и должна обеспечивать:

- бесперебойное и надежное функционирование и развитие городских, градостроительных, производственно-технических, коммуникационных, транспортных объектов, зон отдыха и других территориальных систем и отдельных сооружений;

- условия для нормального производства сельскохозяйственной, лесной и рыбной продукции;
- гидрологический и гидрогеологический режимы на защищаемой территории в зависимости от функционального использования земель;
- рациональное использование и охрану земельных, водных, минерально-сырьевых и других природных ресурсов.

ПСРГ представляет собой плотину с отверстием, которое пропускает расход воды, не превышающий критического по условию затопления территории в нижнем бьефе. ПСРГ служит в первую очередь для решения гидрологической задачи по изменению формы гидрографа в створе (местоположении) соответствующей плотины. Гидрограф катастрофического паводка должен стать более пологим.

В случае, если ПСРГ распределить по водотокам некоторого бассейна, то в контрольном створе бассейна гидрограф будет также иметь более пологий вид без пиков, характерных для катастрофических паводков и риски для населения будут понижаться (рис. 6).

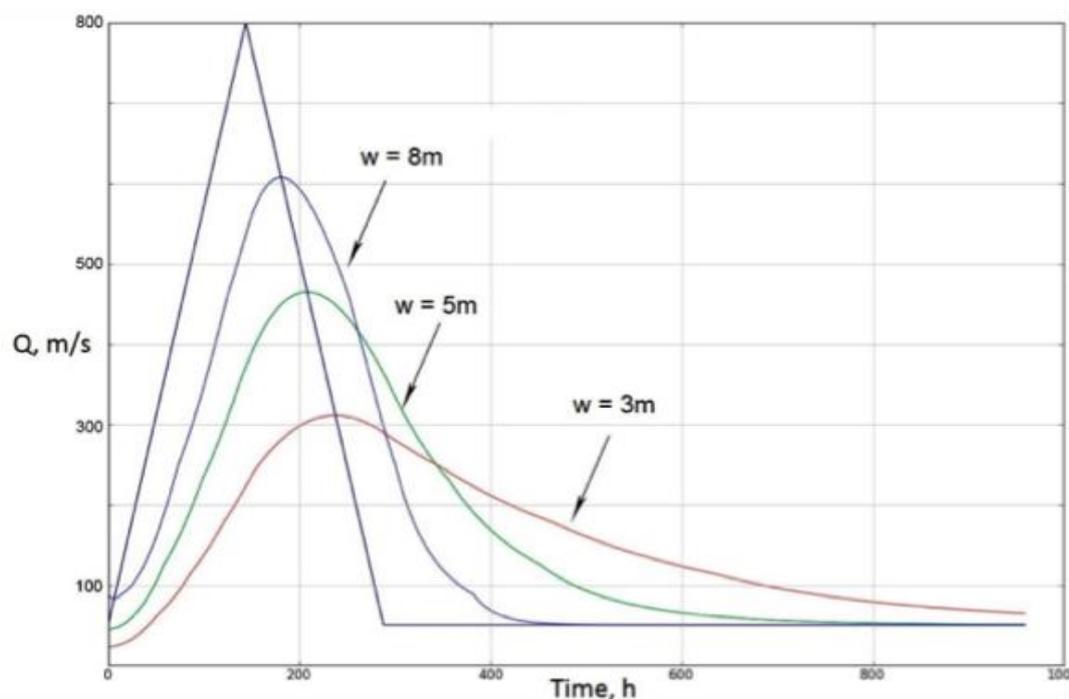


Рисунок 6. Гидрограф СРГ узла в нижнем бьефе, при разной ширине отверстия.

Существует большое количество моделирующих комплексов для управления водными бассейнами, работающим с ГИС, например, MIKE SHE.

Так же можно отметить программные пакеты FloodWorks, PCSWMM и другие. Основным недостатком большинства таких программ является дорогая стоимость их приобретения. При этом нужно учитывать, что это модули со специализированным ограниченным функционалом, поэтому при расширенном моделировании с учетом множества аспектов возникает необходимость приобретения нескольких программных пакетов, соответственно стоимость увеличивается в разы. Также необходимо учитывать затраты на обучение специалиста необходимым программным комплексам. Сравнительный анализ программных комплексов приведен в таблице 2. Для работы был выбран комплекс HEC-RAS с модулем HEC-GeoRAS.

Таблица 2. Сравнительный анализ программных комплексов для управления водными бассейнами, работающих на основе ГИС

| Комплекс | Характеристика |
|----------|--|
| HEC | <p>1) HEC-RAS - одномерные гидравлические расчеты для сети природных и построенных каналов;</p> <p>2) HEC-FIA - анализ последствий наводнений. Расчет ущерба строениям, от потерь сельскохозяйственных угодий, оценка возможных людских жертв.</p> <p>3) HEC-HMS – анализ гидрологических процессов на уровне речных бассейнов, включая модель осадки-сток.</p> <p>4) HEC-ResSIM - моделирование различных ситуаций на водохранилищах.</p> |

| | |
|------------|--|
| MIKE | <p>1) HYDRO RIVER - моделирование зон затоплений, последствий гидротехнических аварий, прогноза паводков и половодий в сложной системе рек и каналов.</p> <p>2) FLOOD - моделирование карт затоплений, последствий гидротехнических аварий, течений, волн, переноса примесей в открытых водоемах и системах рек и каналов.</p> <p>3) SHE - анализ, прогноз и управление водными ресурсами.</p> <p>4) HYDRO BASIN - планирование и управление водными ресурсами в рамках одного или нескольких речных бассейнов, разработки генеральных схем использования водных ресурсов, решения широкого круга водохозяйственных задач.</p> |
| FloodWorks | <p>Моделирование в реальном времени и прогнозирование будущих гидрологических и гидравлических условий в речных бассейнах, ливневых и дренажных системах, на территории прибрежных районов.</p> |
| PCSWMM | <p>Расчет динамического ливневого стока для отдельного события и долгосрочного (непрерывного или рекордного) количества и качества</p> |

| | |
|--|--|
| | стока из городского или сельского районов. |
|--|--|

По итогам сравнительного анализа было решено проводить моделирование в программном комплексе HEC-RAS, с применением модуля HEC-GeoRAS для работы с цифровой моделью рельефа в ArcGIS или QGIS. В настоящее время HEC-RAS способен выполнять одномерные расчеты профиля водной поверхности для устойчивого постепенно изменяющегося потока в естественных или построенных каналах (рис.6). Могут быть рассчитаны профили водной поверхности с докритическими, сверхкритическими и смешанными режимами течения.

2. Исходные данные

Разработка модели речного бассейна для определения местоположения ПСРГ в каждом случае начинается со сбора исходных данных. Самым важным актуальным источником информации для различных слоев базы данных в среде ГИС являются данные дистанционного зондирования (ДДЗ).

2.1. Пространственные данные

Пространственные данные представлены цифровой моделью рельефа (ЦМР) (рис. 7). Использование цифровых фотограмметрических станций (ЦФС) для создания ЦМР на основе ДДЗ является успешно зарекомендовавшей себя методикой. С помощью программных пакетов ГИС возможно использовать полученные результаты для получения геометрических, морфометических, гидрологических и других особенностей рельефа для моделируемого речного бассейна.

Во время разработки ЦМР в среде ГИС в нее вносятся данные с гидрографов, данные о затопляемых районах, что в совокупности является необходимым базисом для разработки комплексной модели наводнений и их последствий.

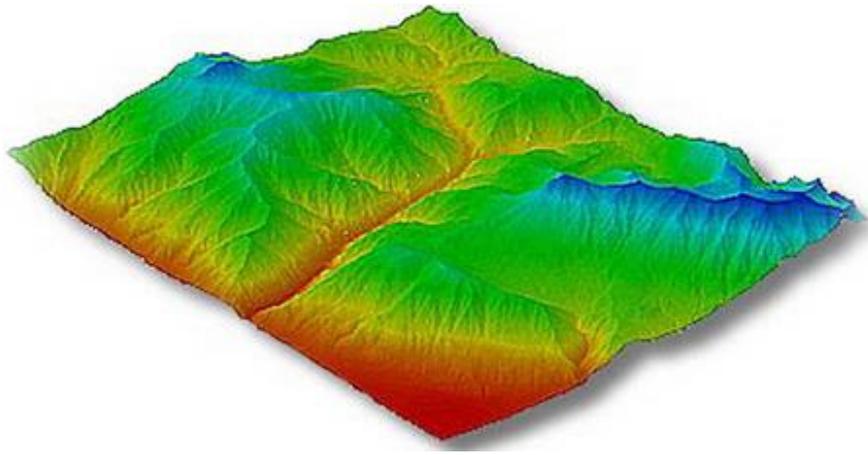


Рисунок 7. Пример цифровой модели рельефа.

2.2. Гидрологические данные

Характеристики речного стока, в том числе максимальные расходы и уровни воды в репрезентативных створах, периодов и продолжительности стояния высоких вод и другие данные могут быть найдены в следующих источниках:

- Картографические материалы (рис. 8);
- Данные гидрологических постов (табл. 1);

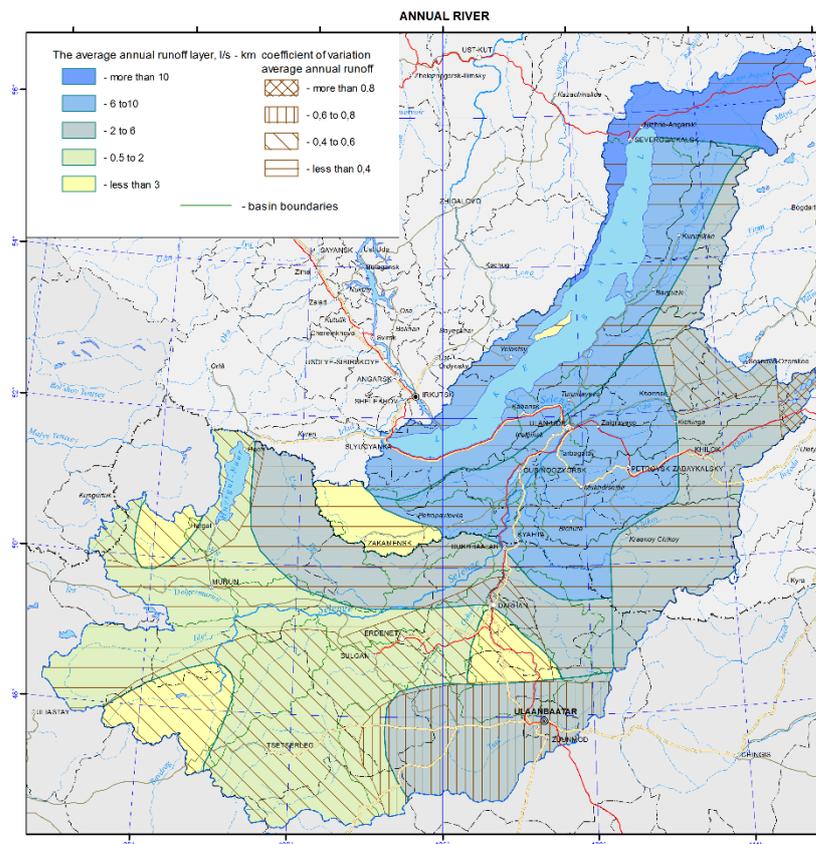


Рисунок 8. Карта среднегодового стока рек

Таблица 1. Пример данных с гидрологических постов

| Номер поста | Название | Код водного объекта | Расстояние от устья, км | Нулевой уровень, м | Средний уровень |
|-------------|------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|
| 6362 | мет.ст. Селемджа | 118103384 | 544 | 0 | 0 |
| 6363 | с.Екимчан | 118103384 | 449 | 480.29 | 0 |
| 6364 | с.Стойба | 118103384 | 326 | 339.66 | 0 |
| 6365 | с.Селемджинское | 118103384 | 262 | 279.52 | 0 |
| 6367 | с.Виссинское | 118103384 | 197 | 259.24 | 0 |
| 6369 | Норск | 118103384 | 134 | 200.49 | 0 |
| 6370 | Уланочка | 118103384 | 108 | 190.12 | 0 |

2.3. Данные речной сети

Данные о времени стояния паводковой воды на определенном уровне, необходимые для моделирования, могут быть получены при наличии точного гидрографа и знания определенных характеристик конфигурации ПСРГ. Таким образом, для моделирования с учетом экологического критерия, необходимо получить данные о соответствующей речной сети, а также данные землепользования.

Расчетные основы моделирования

Расчетная модель комплекса основана на вычислении профилей поверхности воды (рис. 9). Профили поверхности воды вычисляются от одного сечения к другому путем решения уравнения Бернулли с итерационной процедурой, так называемый стандартный метод шага. Уравнение Бернулли представляет собой закон сохранения энергии для двух соседних участков и записывается следующим образом:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 * V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 * V_1^2}{2g} + h_e$$

(1)

где: Z_1, Z_2 – высоты в точках основного канала, взятые от заданного локального датума; Y_1, Y_2 – глубина воды в поперечных сечениях; V_1, V_2 – средние скорости; a_1, a_2 – весовые коэффициенты для скоростей; g – ускорений свободного падения; h_e – потери напора.

Уравнение для потери напора, которые используются в НЕС, выглядит следующим образом:

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 * V_2^2}{2g} - \frac{a_1 * V_1^2}{2g} \right|$$

(2)

где: L – средневзвешенная длина элемента; \bar{S}_f – характерный гидравлический уклон между двумя секциями; C – коэффициент сжатия или потери расширения.

Длина элемента, взвешенная на расход, рассчитывается в НЕС так:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

(3)

где: L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} – длины участка в поперечном сечении, отдельно для расхода у левого берега, центра русла и у правого берега; $\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}$ – среднее арифметическое расходов между поперечниками для левого берега, центра канала и правого берега, соответственно.

Определение общего коэффициента пропуска и коэффициента скорости для поперечного сечения которые используются в НЕС, требует, чтобы поток подразделялся на «блоки», на которых скорость распределяется равномерно. Подход, используемый в программных комплексах (в частности, в НЕС-RAS) – разделение потока в области берегов, с точками изменения n – коэффициента шероховатости. Коэффициент пропуска рассчитывается в пределах каждой области из следующего вида формулы Маннинга:

$$Q = KS_f^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (5)$$

где: K – коэффициент пропуска для области; A – площадь поперечного сечения для потока в области; R – гидравлический радиус для области; S_f – характерный гидравлический уклон между двумя секциями.

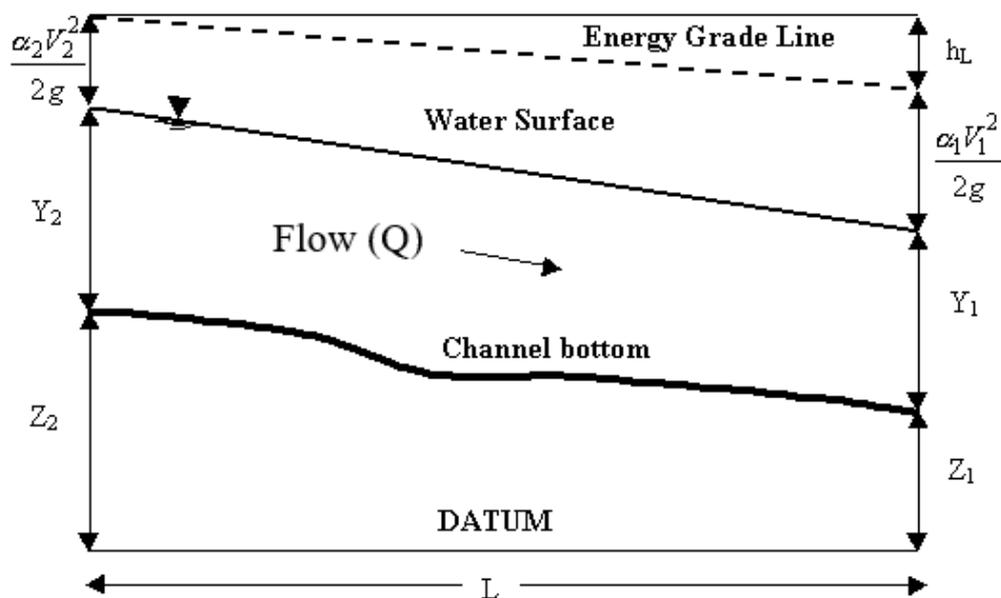


Рисунок 9. Графическая схема метода

Модельные расчеты возможных сценариев развития наводнений

Для апробации предложенного метода был рассмотрен гипотетический бассейн реки. Работа по созданию модели состоит из следующих этапов:

- моделирование внутри программного комплекса ArcGIS с модулем HEC-GeoRAS для работы с рельефом и создания речных сетей и поперечников;
- непосредственная работа в программном комплексе HEC-RAS, где происходит редактирование речных створов и объектов на них, и определение гидрологических свойств самого водотока;
- создание требуемой модели, как статической, так и динамической (задавая гидрографы в конкретном створе).

На основе данных дистанционного зондирования (ДДЗ) прокладываются речная сеть, береговая линия, а также указывается направление течения реки (рис. 10).

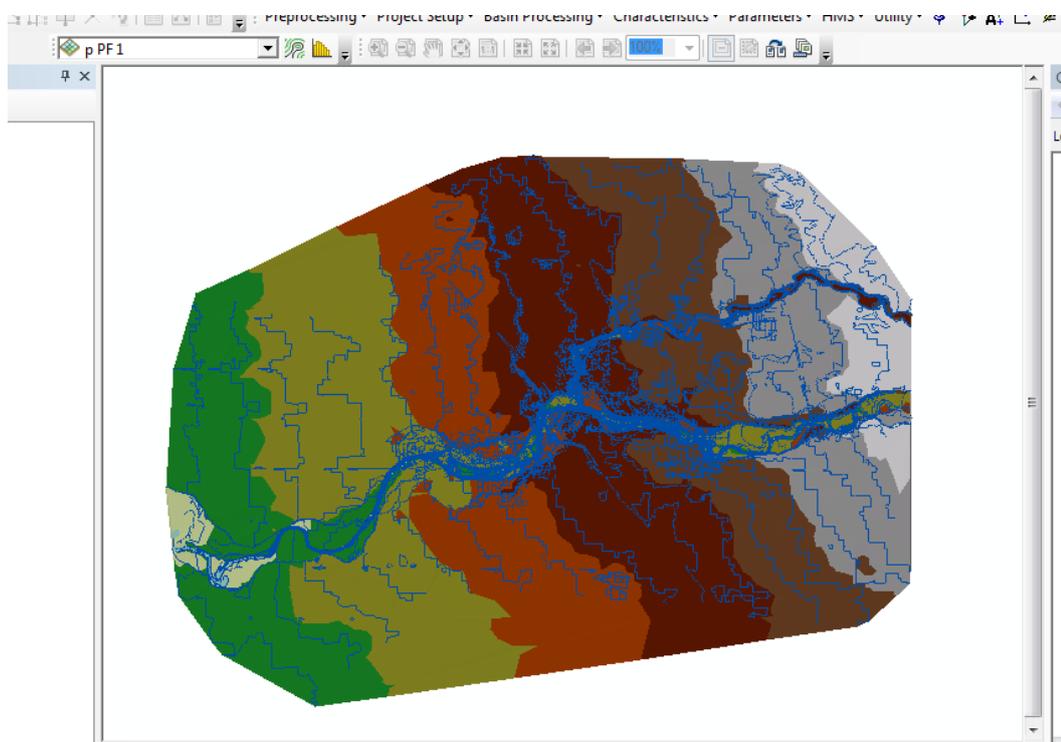


Рисунок 10. Цифровая модель рельефа (ЦМР) рассматриваемого участка бассейна реки.

Далее создаются поперечные сечения. При расчете зон затопления НЕС использует построенные поперечные сечения, в соответствии с вышеприведенными формулами 1-5. Они могут быть заданы автоматически, с определенными интервалом и шириной, а также вручную. Программный комплекс анализирует данные с учетом расстояний и возвышения местности и создает файл для экспорта в HEC-RAS. На следующем этапе, с помощью инструментов программного комплекса HEC-RAS происходит обработка импортируемых данных из ArcGIS, а также задание гидрологических условий. После создания отдельного проекта в рамках HEC-RAS моделирование начинается с вкладки Geometric Data. Здесь возможно отредактировать каждое поперечное сечение, уменьшить количество точек, по которому оно строится или произвести сглаживание створа, в случае, если работа с исходным руслом невозможна в силу программных ограничений. Такие ограничения возникают из-за возможного появления эффекта «ложных» русел. Если наличествуют

большие перепады высот рельефа, то программа может идентифицировать их как самостоятельные русла, и при этом возникнет ошибка расчета.

Также во вкладке Geometric Data задается коэффициент Маннинга, изменяются характеристики речной сети. Дополнительно можно задать какие-либо гидрологические сооружения на определенном створе (была проведена легкая корректировка поперечных сечений и задан синтетический коэффициент шероховатости (рис. 11). Далее проводится работа либо с SteadyFlow Data, или же с UnsteadyFlow Data, в зависимости от желаемого типа модели. В итоге был проведен анализ заданных данных с помощью модуля SteadyFlow Analysis и получаем модель зоны затопления конкретного участка речного бассейна.

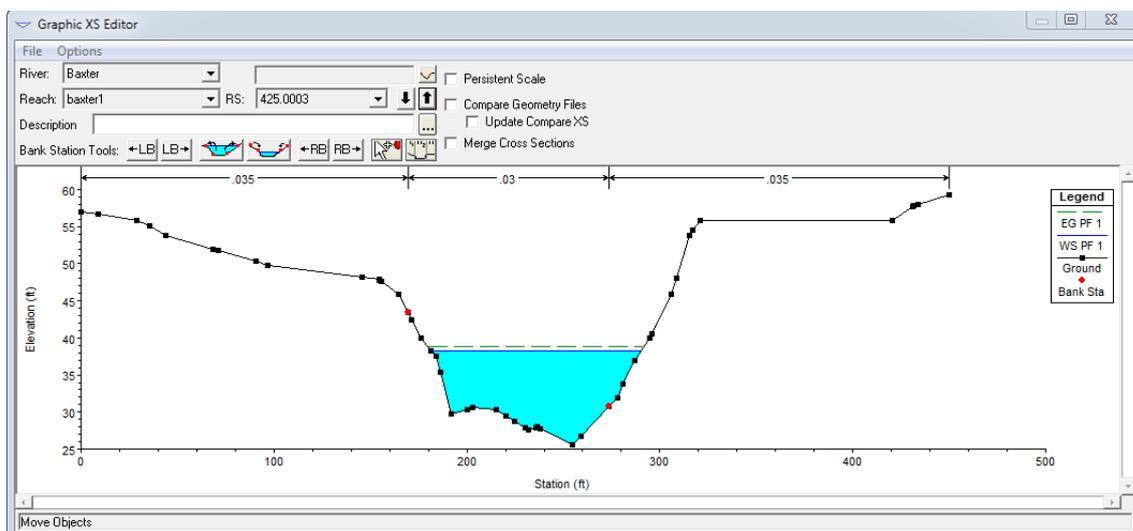


Рисунок 9. Редактирование поперечных сечений.

Заключение

В условиях увеличения антропогенного воздействия на природную среду и глобального экономического кризиса система саморегулируемых противопаводковых гидроузлов с временно-заполняемыми водохранилищами в бассейне реки является целесообразной мерой снижения риска от паводковых наводнений. В этом случае регулирующая емкость от затопления может быть распределена равномерно, при этом возможно защитить значительные площади как в пойме реки, так и в ее верховьях, и на боковых притоках, от вредного воздействия паводковых вод.

В ходе работы была сформулирована методика моделирования паводковых ситуаций, основанная на использовании программных комплексов на основе ГИС, сформулированы требования по исходным данным и основной алгоритм действий. Результаты исследования убедительно показывают, что благодаря создаваемым моделям затопления территорий с применением технических средств защиты (в виде сети ПСРГ и временно-заполняемых водохранилищ) возможно проанализировать как уже случившиеся паводковые наводнения, так и моделировать возможные паводки заданной обеспеченности. На основе таких моделей возможно принятие управленческих решений касательно проведения противопаводковых мероприятий. Преимуществом предложенной методики является возможность обоснования местоположения предложенных технических мер (системы ПСРГ с определенными параметрами в бассейне реки) с учетом оценки воздействия на экосистемы в бассейне реки. Недостаток данного метода – крайняя степень зависимости от исходных данных касательно ЦМР, а также необходимость мощного оборудования (персональный компьютер) для создания модели по большим участкам бассейнов рек, так как из-за особенностей работы ГИС-комплексов загрузка сгенерированной модели на слабых компьютерах занимает значительное время.

Направление дальнейших исследований будет следующим: применение сформулированной методики для моделирования уже произошедших

паводковых наводнений (на основе имеющихся гидрологических данных), сравнение с реальными показателями, выявление ограничений и недостатков предложенной методики.

Библиографический список диссертации

- [1] Аракелян С.М., Акимов В.А., Трифонова Т.А., Абрахин С.И., Тюленев Н.Ю., Трифонов Д.В., Кучерик А.О. Комплексные подходы и моделирование при оценке и управлении рисками – катастрофические наводнения и сели// Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий. 2015. с. 84-90.
- [2] Болгов М.В., Алексеевский Н.И., Гарцман Б.И., Георгиевский В.Ю., Дугина И.О., Ким В.И., Махинов А.Н., Шалыгин А.Л. Экстремальное наводнение в бассейне Амура в 2013 году: анализ формирования, оценки и рекомендации// География и Природные Ресурсы. 2015. №3. С. 17-26.
- [3] Попов С.Е. Совершенствование на основе геоинформационных технологий оценки аварийного риска при эксплуатации гидротехнических сооружений// Инновационные Информационные технологии. 2013. №2. С. 332-337.
- [4] Кулейко А.С. Применение концептуальной модели «Сакраменто» для Казахстанского типа рек// Наука и образование. 2014. №2014. С. 4347-4349.
- [5] Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А. Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края// Гидротехника. 2013. № 4.
- [6] Георгиевский Ю.М. Гидрологические прогнозы// СПб.: РГГМУ. 2007. 436 с.
- [7] Истомина М.Н., Кочарян А.Г., Лебедева И.П., Никитская К.Е. Экологические последствия наводнений// Инженерная экология. 2004. № 4. С. 3-19.
- [8] Проскура Д.Ю., Ткаченко Т.И. Экологические последствия наводнений и способы защиты от них// Научные труды Дальрыбвтуза. 2013. Том 29. С. 24-30.
- [9] URL: <http://meteo.ru/> [электронный ресурс]
- [10] Воронина П.В., Мамаш Е.А. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS// Вычислительные технологии. 2014. Том 19, №3. С. 76-102.

- [11] Юлдашева К.А. Борьба с паводками: обзор мирового опыта// Информационный сборник НИЦ МКВК. 2010. №2(33). С. 1-68.
- [12] Nikonorov A., Badenko V., Terleev V., Togo I., Volkova Yu., Skvortsova O., Nikonova O., Pavlov S., Mirschel W. Use of GIS-environment under the analysis of the managerial solutions for flood events protection measures// Procedia Engineering. 2016. №165. pp. 1731-1740.
- [13] Nikonorov A., Terleev V., Badenko V., Mirschel W., Abakumov E., Ginevsky R., Lazarev V., Togo I., Volkova Yu., Melnichuk A., Dunaieva I., Akimov L. Modeling the hydrophysical soil properties as a part of selfregulated flood dams projection in GIS-environment for sustainable urban development// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Article number 012109.
- [14] Федоров М.П., Масликов В.И. Снижение риска наводнений в речном бассейне регулированием паводков распределенными на водосборе гидроузлами // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 4. С. 47-52.
- [15] Елистратов В.В., Масликов В.И., Фан Вьен Фыонг. Регулирование стока речного бассейна системой распределенных на водосборе гидроузлов. // Тезисы докладов. Международная НТК «Гидротехника и гидроэнергетика: проблемы строительства, эксплуатации, экологии и подготовки специалистов». Самара. 2002. С. 63-68.
- [16] Федоров М.П., Елистратов В.В., Масликов В.И. Регулирование паводков и расходов реки гидроузлами, распределенными в ее бассейне. // Тезисы докладов «Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий» VI Всероссийский гидрологический съезд. СПб. 2004. С. 86-87.
- [17] Федоров М.П., Масликов В.И., Баденко В.Л., Чусов А.Н., Молодцов Д.В. Снижение риска наводнений распределенными на водосборе гидроузлами// Гидротехническое строительство. 2017. № 5. С. 2-7.
- [18] Романовский Р.В. Применение методов компьютерного моделирования зон затопления при максимальных расчетных уровнях воды для решения

проектных задач при рекультивации нарушенных земель, а также проектировании зданий и сооружений вблизи водных объектов// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. №2. С. 186-201.

[19] Баденко В.Л., Баденко Н.В., Иванов Т.С., Олешко В.А., Петрошенко М.В. Результаты оценки гидроэнергетического потенциала рек России в разрезе по субъектам РФ// Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 2015. № 276. С. 57-69.

[20] Sazonov A.A., Krylenko I.N., Golovlev P.P. Assessment of the effectiveness of flood control dams using mathematical modeling methods (on the example of the Tom river in the city of Mezhdurechensk)// Prirodoobustroystvo. 2015. №4. pp. 73–76. (rus)

[21] Кит М.Р., Плесовских С.В. Построение информационной системы для прогнозирования последствий паводков на основе результатов дистанционного зондирования Земли// Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». 2015. №1. С. 186-192.

[22] Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС// Инженерно-строительный журнал. 2013. № 4(39). С. 70–82.