

УДК 004.5+528.9

doi: 10.18101/2304-5728-2016-2-77-84

© *А. Е. Хмельнов, А. С. Гаченко*

### **Реализация совмещения неточной модели рельефа речного дна с моделью надводного рельефа<sup>1</sup>**

Данная работа посвящена разработке гибридной геоинформационной системы для формирования прогноза зон возможного затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС с оценками ущербов в условиях экстремальной водности на оз. Байкал и притоках р. Ангары.

Для построения 3D модели русла реки Ангары был использован Атлас “Карта реки Ангара от Иркутской ГЭС до 142 км в масштабе 1:10000” ГП “Водные пути Восточно-Сибирского бассейна”, Иркутск, 1994г. В связи с отсутствием цифровой модели (карты), была оцифрована бумажная карта при помощи программы векторизатора Easy Trace 7.99. Были оцифрованы также изолинии глубин, отметки глубин и береговая линия.

Для совмещения данных о надводном и подводном рельефе было разработано специальное программное обеспечение с использованием алгоритмов триангуляции Делоне. Для слоев данных указаны их роль при построении триангуляции. Слои содержат сведения о: наземном рельефе, отметках уреза воды, контурах береговых линий, подводном рельефе. Для работы с подводным рельефом используется информация об отметках уреза воды. По этим данным строится вспомогательная триангуляция, из которой далее извлекается информация об отметках высот, к которым привязываются контуры береговых линий и относительно которых отсчитываются глубины.

В результате выполненной работы по оценке экстремальных паводков при различных сценариях экстремальной водности в бассейнах р. Ангары и оз. Байкал создана гибридная геоинформационная система, которая позволяет моделировать различные сценарии наводнений и определять зоны затопления с учетом подводного и надводного рельефа.

**Ключевые слова:** ГИС, затопление, озеро Байкал, река Ангара, рельеф, 3- D модель.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке в рамках интеграционного проекта 4.10: «Разработка единых методических подходов в определении антропогенного воздействия на поверхностный водоем в зоне субкавальной разгрузки загрязненных бытовыми стоками грунтовых вод (на примере района п. Листвянка) и грантов РФФИ № 16-07-00411\_a, 16-57-44034\_монг\_a, 14-07-00166\_a

© *A. E. Hmelnov, A. S. Gachenko*

### **Achievement of inaccurate river underwater topography model combination with above-water relief model**

This work is devoted to development of hybrid geoinformation system for making forecasts for areas of possible flooding in the downstream of the of the Irkutsk hydroelectric station with damages assessment in extreme water content conditions for lake Baikal and effluents of the Angara river.

For 3D model construction of the Angara's bed they used Atlas "Map of the Angara River in Irkutsk hydroelectric power station till 142 km on scale of 1:10000" General plan of "Waterways of the East Siberian basin ", Irkutsk, 1994. Due to lack of a digital model (map), a paper-based map was digitized using vectorizer program Easy Trace 7.99. Depth contours, marks and bank lines were also digitized.

To combine the data about land and underwater relief a specific software was developed using Delaunay triangulation method. For data layers their role in the construction of triangulation is specified. The layers contain information about: land relief, standing water levels, shore lines, underwater topography. To work with the underwater relief information about standing water levels is used. Auxiliary triangulation is made according to the data whereof further information is revealed regarding heights levels to which shore lines contours are attached and in reference to which depths are measured.

As a result of the works execution according to evaluation of extreme floods under various cases of extreme water content in the basin of the Angara river and Lake Baikal hybrid geographic information system is made, which allows to simulate different scenarios of flooding and to determine the flood zones with account for underwater and land relief.

**Keywords:** GIS, flooding, lake Baikal, river Angara, surface, 3-D model.

В ходе выполнения проекта по расчёту зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС возникла необходимость получения модели рельефа, учитывающей форму речного дна. Если надводный рельеф с разной степенью детализации представлен на топографических векторных электронных картах различных масштабов, то информацию о подводном рельефе реки Ангары в электронном виде найти не удалось. Существующие данные о глубинах для некоторых навигаторов имеют фрагментарный характер и по отзывам специалистов не отличаются какой-либо точностью. Единственным достоверным источником оказался атлас, который распространяется в бумажном виде. В связи с этим возникла необходимость оцифровки представленных там карт и их совмещения с имеющейся топоосновой.

Оцифровка бумажного Атласа карт реки Ангары была проведена при помощи свободно распространяемого векторизатора картографических изображений Easy Trace 7.99. Были оцифрованы: изолинии глубин, отметки точек глубины, береговая линия.

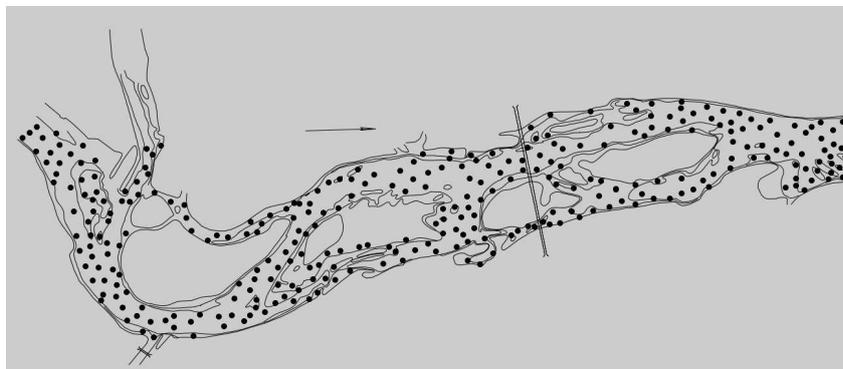


Рис. 1. Результат оцифровки

Листы атласа ориентированы в произвольных направлениях с целью наиболее компактного размещения участков реки на страницах. Для их дальнейшего использования были выполнены поворот и сдвиг в систему координат карты, содержащей модель рельефа. Для выбора параметров поворота проводилось сопоставление характерных точек контуров береговых линий (мысы, заливы, оконечности островов и т.д.) двух карт. Была реализована вспомогательная программа, которая вычисляет параметры преобразования по заданному списку пар координат точек и выполняет преобразование карты. Для поиска параметров преобразования используется метод наименьших квадратов. Для работы метода достаточно задать две пары соответствий точек, но использование большего их числа позволяет получить более точный результат, а также оценить эту точность по среднеквадратичному отклонению. Среднеквадратичное отклонение по заданным примерам при этом составляло 25-70 м. Величина отклонения объясняется наличием существенных расхождений контуров, поскольку эти расхождения могут затрагивать и используемые для задания соответствия карт характерные точки.



Рис. 2. Сопоставление карт

Попытка совмещения контуров векторизованной береговой линии с береговой линией топоосновы показала, что используемый атлас был подготовлен схематично, без привязки к какой-либо карте (Рис.2). Т.е. в атласе отражаются характерные изгибы береговой линии, но совместить эту линию с более точным контуром посредством поворота и сдвига невозможно. Опыт использования вычисляемого по сопоставленным характерным точкам преобразования поворота и сдвига показал, что получаемый результат уже не удаётся заметно улучшить путём уточнения параметров преобразования.

Для того, чтобы сделать возможным использование для построения модели рельефа недостаточно точных данных, было разработано программное обеспечение для морфинга электронных карт. Для выполнения морфинга необходимо найти непрерывное преобразование плоскости, которое может совместить неточные контура береговых линий с более точными. Слои береговых линий используются для совмещения карт потому, что они присутствуют на обеих картах. После этого то же преобразование применяется к другим слоям карты подводного рельефа (изобатам и отметкам глубин). Полученные в результате данные оказываются лучше согласованными с информацией о надводном рельефе, по крайней мере, трансформированные изобаты и отметки глубин не выходят за пределы береговой линии. Сами преобразованные контура береговых линий не используются, поскольку более точные береговые линии уже имеются, поэтому допустимо их отклонение от целевых линий, например, в результате добавления запретов совмещения. Главное, чтобы зоны отклонения контуров не содержали данные используемых слоёв неточной карты. Для выполнения морфинга карт реализовано два отдельных программных модуля: для полуавтоматического задания параметров совмещения контуров и для выполнения преобразования.

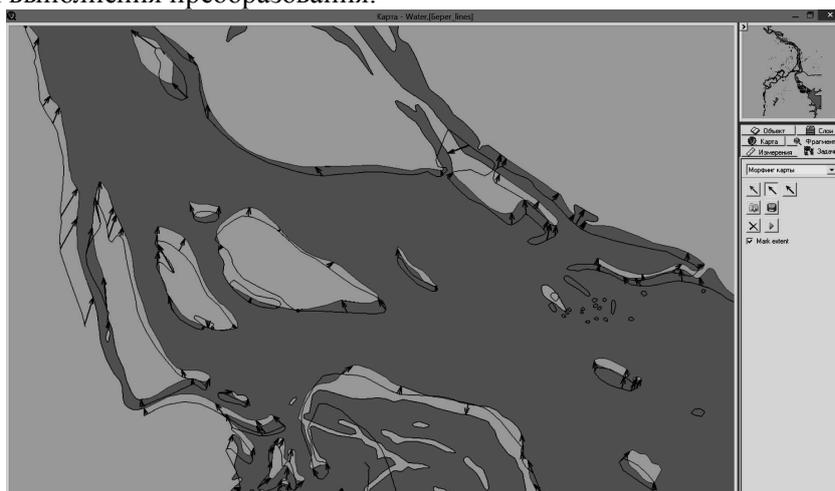


Рис. 3. Настройка преобразования для совмещения контуров.  
Точная карта отображается с заливкой, перемещаемая –  
в контурном представлении

Совмещение контуров реализовано в виде специальной задачи в программе просмотра электронных карт IrgGV (Рис. 3). При работе этой задачи оператор задаёт стрелки, совмещающие точки исходной (неточной) и целевой (точной) карт. При совмещении контуров начальная и конечная точки нарисованных пользователем стрелок проецируются на ближайшие к ним точки контуров соответствующих карт. Далее строится отображение каждого участка контура объекта исходной карты в указанный участок контура объекта целевой карты для каждой пары стрелок, являющихся соседними на обоих контурах. Таким образом, если, например, между точками одного из контуров добавить стрелку, совмещающую эту точку с третьим контуром, то сопоставление участков контуров выполняться перестанет.

Отдельно обрабатывается случай сопоставления двух замкнутых контуров. Без учёта этого случая пришлось бы задавать не менее трёх пар соответствующих точек для того, чтобы однозначно связать участки контуров. При выборе участков для сопоставления по меньшему числу соответствий точек учитываются направления обхода контуров: друг с другом сопоставляются участки контуров, имеющие одинаковое направление обхода. Это позволяет задавать соответствие между контурами даже по одной паре точек.

Отображение точек сопоставленных между собой участков контуров выполняется при помощи линейного преобразования параметрических координат кривых. Если получающийся при этом результат не устраивает, то для того, чтобы гарантировать совмещение некоторых характерных точек контуров, необходимо явно сопоставить между собой эти точки. После ввода информации о совмещении карт формируется файл перемещений, в который, помимо явно заданных сдвигов, попадают сдвиги, вычисленные для промежуточных точек контуров. Запрет совмещения фрагментов контуров требуется в тех случаях, когда сопоставляются фрагменты, представленные с разной степенью детализации. Например, на точном контуре обозначен залив, который на менее точном отсутствует. В этом случае лучше избежать сопоставления соответствующего заливу фрагмента с прямым участком преобразуемого контура.

Для выполнения преобразования морфинга реализована соответствующая операция в программе построения триангуляций. При этом по исходным точкам из файла перемещений строится триангуляция с ограничениями. Жёсткие рёбра добавляются для соседних точек одного контура. В каждой точке триангуляции дополнительно запоминается вектор сдвига в целевую точку. После чего выполняется обработка слоёв в формате Shape: каждая точка перемещается на вектор, полученный линейной интерполяцией из точек триангуляции.

Для совмещения данных о надводном и подводном рельефе была доработана форма построения триангуляции по слоям карты. Для каждого слоя теперь указывается его роль при построении триангуляции. Слой может содержать сведения о: наземном рельефе, отметках уреза воды,

контурах береговых линий, подводном рельефе. Для работы с подводным рельефом обязательно предоставить информацию об отметках уреза воды. По этим данным строится вспомогательная триангуляция, из которой далее извлекается информация об отметках высот, к которым привязываются контура береговых линий и относительно которых отсчитываются глубины.

Для вычисления зон затопления используется построение изолиний по триангуляции, высоты точек которой определяются разностью высот на исходном рельефе и вычисленным уровнем воды при затоплении. Этот подход позволяет получить более точные результаты и охватить большую территорию, чем часто используемое в таких случаях построение изолиний по модели рельефа для высоты равной уровню воды в некоторой точке увеличенному на высоту подъема воды в этой точке.

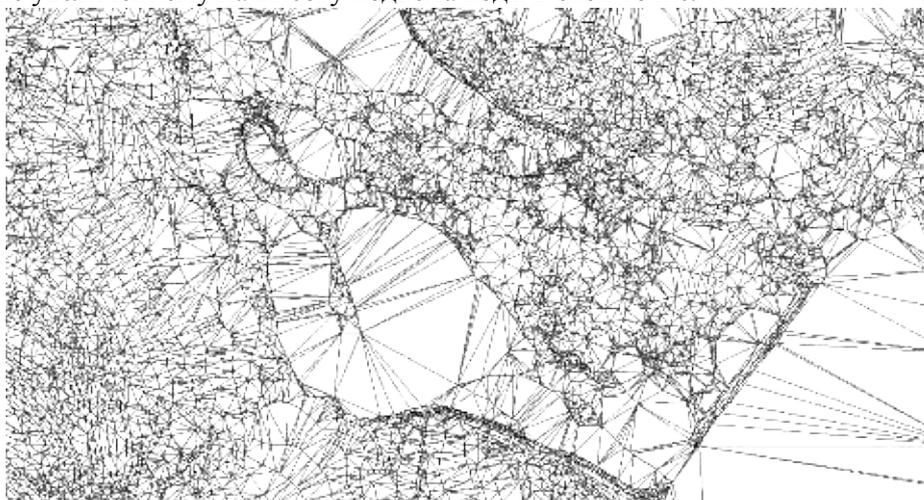


Рис. 4. Фрагмент сформированной триангуляции, содержащей сведения о наземном и подводном рельефе

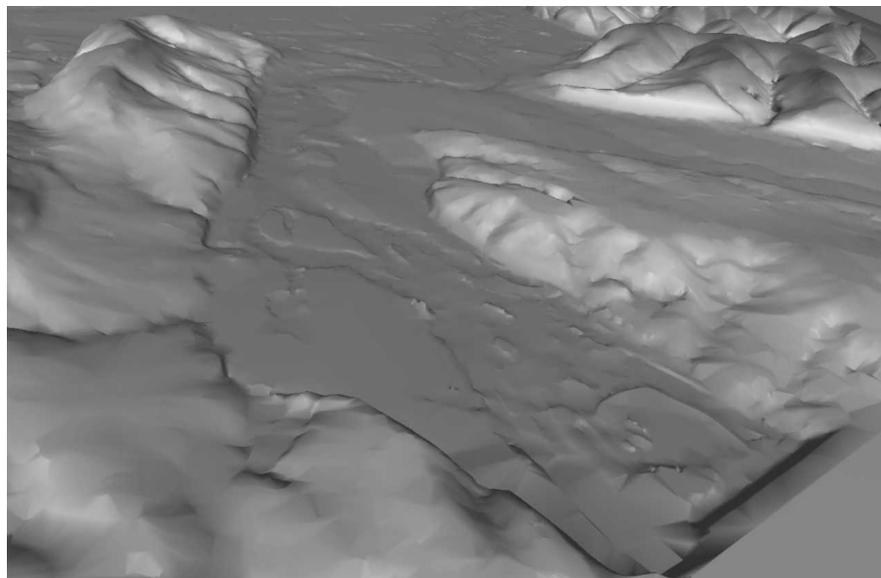


Рис. 5. Совмещённый рельеф (высота увеличена для наглядности)

Сформированная модель рельефа сохраняется в файле триангуляции (файлы с расширением .trg) и может быть использована для выполнения дальнейшего анализа с применением динамической библиотеки TrigLib.dll, предназначенной для работы с этими данными. Данная библиотека позволяет получать из триангуляции высоту рельефа в произвольной точке и выполнять прослеживание линии, т.е. получать сечение рельефа вдоль отрезка или ломаной.

Кроме основной триангуляции, содержащей сведения о рельефе, также формируется вспомогательная, построенная по отметкам урезов воды, которая содержит сведения о поверхности уровня воды, использованной для построения обобщённой модели рельефа.

В программе построения триангуляций реализованы алгоритмы формирования морфостворов по заданным в файле координатам, построения изолиний рельефа по заданной триангуляции, а также вычитания высот, заданных одной триангуляцией, из высот точек другой триангуляции. Таким образом, для построения зон затопления строится триангуляция, учитывающая вычисленный уровень воды.

На основе использования динамической библиотеки TrigLib.dll была разработана программа для формирования высотных показателей по произвольно заданному виду сечения р. Ангара.

---

### Заключение

В результате выполненной работы по оценке экстремальных паводков при различных сценариях экстремальной водности в бассейнах р. Ангары и оз. Байкал создана гибридная геоинформационная система, которая позволяет моделировать различные сценарии наводнений и определять зоны затопления с учетом подводного и надводного рельефа.

*Хмельнов Алексей Евгеньевич*, кандидат технических наук, зам. директора Института динамики систем и теории управления СО РАН им. В.М. Матросова, e-mail: hmelnov@icc.ru.

*Гаченко Андрей Сергеевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН им. В.М. Матросова, e-mail: gachenko@icc.ru.

*Hmelnov Alexey Evgenievich*, PhD in Engineering, Vice-Director of Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS.

*Gachenko Andrey Sergeevich*, PhD in Engineering, Senior Researcher of Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS.