

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Работа посвящена задаче моделирования речного стока бассейнов рек Урала и Сакмары Оренбургской области. Представлена методика использования ГИС-технологий для определения характеристик водных объектов и визуализации результатов моделирования.

Ключевые слова: речной сток, рельеф, математическая модель, геоинформационные системы, программный комплекс.

В настоящее время для моделирования стока рек – одной из главных гидрологических характеристик – разработано и применяется множество методов. Для их использования необходимы сведения о физико-географических и гидрографических характеристиках исследуемого района. До недавнего времени они определялись традиционными трудоемкими ручными измерениями на топографических картах. Интенсивное развитие компьютерной техники и информационных технологий в последнее время позволяет получать нужные характеристики с помощью технологий географических информационных систем (ГИС) полнее и быстрее по сравнению с традиционными измерениями.

В связи с этим возникает потребность в разработке методики использования ГИС-технологии для определения физико-географических и гидрологических характеристик водных объектов.

Одной из основных задач в этом направлении является создание единого информационного пространства, учитывающего гидрологические и географические особенности исследуемого водосбора. Оно может быть построено на основе современных геоинформационных технологий. Интеграционный характер геоинформационных систем позволяет создать мощный инструмент для сбора, хранения, систематизации, анализа и представления информации о состоянии водных объектов региона.

Для моделирования речного стока необходимы:

- общегеографическая карта водосбора водотока или их совокупности масштаба 1: 200 000 и крупнее в зависимости от его площади;

- общегеографическая карта региона для оценки общей обстановки на прилегающей к водосбору территории;

- цифровая база климатических данных ФАО (FAOCLIM);

- справочная база наблюдаемых и вычисляемых агроклиматических параметров (база содержит временные ряды метеорологических данных и их усредненные показатели);

- сведения о гидрологических постах;

- база гидрологических данных.

На основе исходных данных составляются цифровая модель рельефа местности и цифровая модель речной сети и водоемов.

Одной из наиболее удобных и эффективных моделей представления поверхностей в трехмерном пространстве является нерегулярная триангуляционная сеть (Triangulated Irregular Network, или TIN). Метод триангуляции выбран в связи с тем, что получаемая поверхность проходит через контрольные точки и не имеет разрывов. В качестве топографической основы используются номенклатурные листы карты масштаба 1: 200000. На ней сходными данными принимаются горизонтали и высотные отметки, урезы воды, линейные элементы гидросети и контуры озер. При построении цифровой модели объекты гидросети рассматриваются как линии явного перегиба рельефа, а замкнутые водоемы – как плоские поверхности замещения одной высотой.

В качестве примера при разработке методики математического моделирования речного стока нами взята Оренбургская область. Для решения поставленной задачи составлена гипсометрическая поверхность территории Оренбургской области, модель рельефа, учитывающая расположение речной сети, водоемов и локальных замкнутых понижений рельефа. По нашим исследованиям [2], размер ячейки грида 60х60 м со стороной ячейки 30 секунд удовлетворяет мощностям среднестатистической ЭВМ

и обеспечивает необходимую точность грида для решения поставленной задачи.

В качестве базы цифровых данных высот в сеточном формате использовалась глобальная база данных ГТОРО30 - глобальная цифровая модель рельефа земной поверхности Геологической службы США.

База гидрологических данных включает сведения о гидрологических постах на водотоках Оренбургской области. База содержит названия и коды постов, ведомственную принадлежность, географические координаты, по которым определяется расстояние от истока и устья реки. На рисунке 1 представлены действующие гидрологические посты.

Разработанная специализированная ГИС предоставляет возможности для автоматизированного определения границ водосбора (рисунок 2).

Гидрологические характеристики (уклон дна реки, глубина и длина аналоговых участков, ширина русла, данные о боковых притоках) позволяют приступить к математическому моделированию речного стока.

Основы теории движения жидкости заложены Ньютоном, Лапласом, Пуассоном, Навье, Стоксом, Буссинеском и другими. В наиболее полном виде концепция математической модели неустановившегося движения водных масс сформировалась после работ Сен-Венана, который сформулировал практически приемлемую теорию, описывающую распространение

паводочной волны в речном русле. В 1871 г. Сен-Венаном было получено дифференциальное уравнение медленно изменяющегося неустановившегося движения воды в непризматическом открытом русле, получившее название динамического уравнения неустановившегося движения, или уравнения Венана. Вместе с уравнением неразрывности оно составляет систему уравнений Сен-Венана. Невозможность аналитического решения системы уравнений Сен-Венана в полном виде привела к появлению упрощенных методов анализа движения паводочных волн. Применение численных методов решения полной системы уравнений Сен-Венана стало возможным с появлением быстродействующих вычислительных машин. В специальной литературе имеются различные варианты решения уравнений Сен-Венана. Модель медленно изменяющегося неустановившегося неравномерного движения водных масс включает уравнение неразрывности и количества движения. Консервативная форма одномерного уравнения неразрывности для речных русел, имеющих боковые притоки, имеет вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q \quad (1)$$

или в развернутом виде:

$$\omega \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q, \quad (2)$$

где Q – расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$),

ω – площадь живого сечения (м^2),

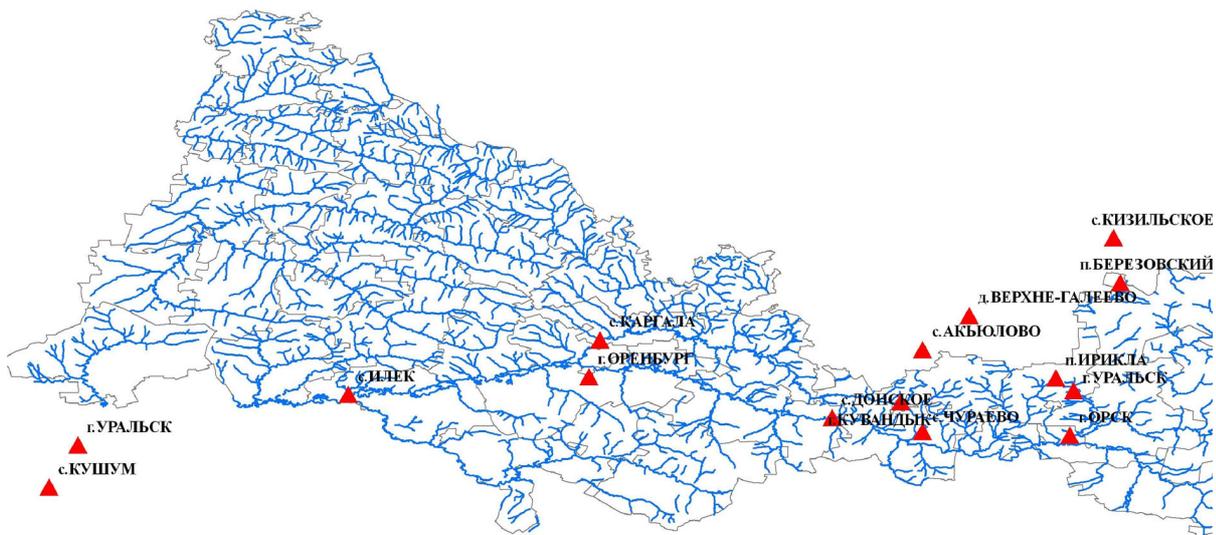


Рисунок 1. Действующие гидрологические посты рек Урала и Сакмары

V – средняя скорость течения (м/с),
 q – боковой приток на единицу длины (м²/с),
 x – пространственная координата (м),
 t – временная координата (с).

Развернутая форма одномерного уравнения движения для речных русел, имеющих боковые притоки, имеет вид:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{\omega} \cdot \frac{\partial(\bar{H}\omega)}{\partial x} + \frac{V \cdot q}{\omega} = g(I - I_T), \quad (3)$$

где g – ускорение силы тяжести (м/с²),

I – уклон дна реки (м/м),

I_T – гидравлический градиент, или уклон трения (м/м),

H – расстояние от водной поверхности до центра тяжести водного сечения.

Уравнение (3) справедливо при следующих допущениях:

- 1) поток прямолинеен и скорости одинаковы по всему живому сечению;
- 2) давление по живому сечению потока подчиняется гидростатическому закону;
- 3) уклон дна реки относительно мал;
- 4) скорость течения воды в русле определяется формулой Шези - Манинга, т. е. существует однозначная зависимость расхода воды от уровня;
- 5) боковой приток поступает в русло нормально к направлению последнего;
- 6) величина бокового притока q отражает пространственный и временной ход бокового притока, для участков без притоков составляя $q = 0$.

Для расчета по уравнениям (2) и (3), описывающим неустановившееся неравномерное движение водных масс, необходимо задать начальные и граничные условия на участке реки.

Термин «начальные условия» означает состояние потока, его скорость или расход во всех точках русла в момент времени $t = 0$. Граничные условия определяют высоту слоя воды, ее скорость или расход в верхнем и нижнем створах участка реки в любой момент времени $t > 0$.

В качестве начального условия заданы параметры равномерного установившегося потока. Для равномерного движения расход воды в открытом русле определен по формуле Шези - Манинга:

$$Q = \omega \frac{k}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{0.5}, \quad (4)$$

где n – параметр шероховатости по Манингу;

R – гидравлический радиус;

I – уклон дна русла;

k – коэффициент пропорциональности.

Для реальных речных русел в условиях неравномерного движения площадь поперечного сечения меняется вдоль реки (координаты x). Неустановившееся движение влечет ее изменение и со временем, т. е. $\omega = \omega(x, t)$. Однако далеко не всегда имеются репрезентативные данные по детальной морфометрии речных русел, поэтому в работе применен другой подход, использованный в свое время Г.П. Калининым. Можно применять уравнения (2) и (3) для участков с неизменными по длине гидравлическими характеристиками. Такие участки Г.П. Калинин называл «характерными». Для каждого характерного участка решается система уравнений Сен-Венана. При этом для первого участка входной гидрограф рассчитывается или читается из файла как исходные данные, затем рассчитывается трансформация стока на этом уча-

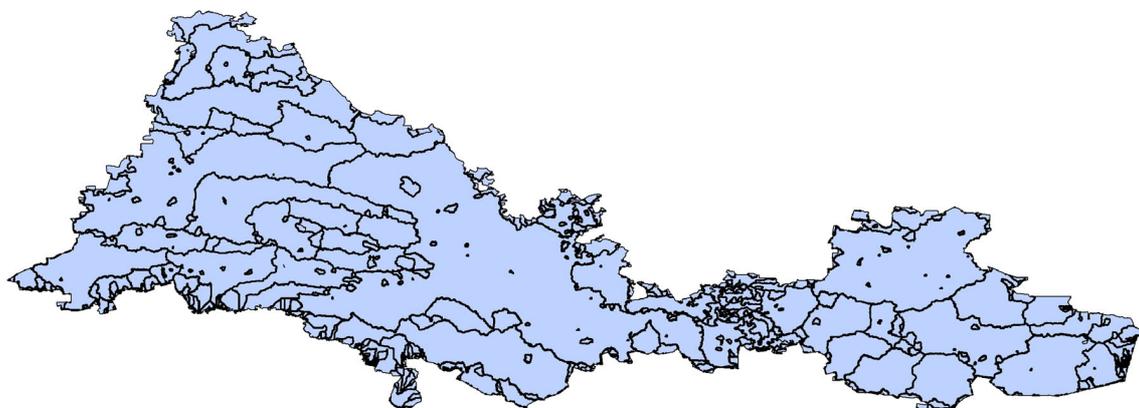


Рисунок 2. Результат предварительного определения границ водосборов

стке и выходной гидрограф, который, в свою очередь, служит входным гидрографом для второго участка, и т. д. Подобный подход позволяет избежать многих математических и вычислительных проблем, существенно упростить алгоритм и, следовательно, повысить скорость счета задачи.

Для создания параллельного варианта алгоритма для данной задачи использовалась среда Borland Delphi 7.0. В этой среде имеется специальный тип объекта – поток, при активации которого система сама создает новый параллельный поток в пределах одного приложения. Для реализации неблокирующего обмена данными между главным потоком приложения и расчетными потоками, вычисляющими значения гидравлических показателей задачи на участках, в среде Delphi существуют несколько способов. Основные из них: метод логических переменных, метод критических секций, метод semaforов. По своей сути принцип работы этих методов мало различается. Все они одинаково обеспечивают переход от потока к потоку, при котором гарантируется, что другие процессы этому обмену не мешают, а также в них не возникнет ошибки при попытке подключения к участникам этого обмена.

Рассмотрим подробнее метод логических переменных, который был использован в данной работе. Когда какой-либо поток получает на вход данные, необходимые для его расчета, становится крайне нежелательным, чтобы какой-нибудь другой поток вновь вызвал его прежде, чем данный поток закончит все вычислительные операции. Для этой цели заводится логическая переменная, которая в нужный момент «закрывает» доступ к работающему потоку. Если таких потоков несколько (а в нашей задаче число работающих потоков равно числу процессоров), то необходимо завести массив из логических переменных, работающих как шлюзы ко всем работающим потокам. Далее остается лишь в каждой части кода, где встречается вызов любого из потоков, осуществлять проверку его занятости, используя соответствующую логическую переменную.

В результате нами сформулирована следующая задача, подлежащая решению и распараллеливанию. Пусть имеется участок реки без притоков ($q=0$), который разбит на N характерных участков. По каждому из участков известны значения их глубин в начальный момент

времени, их длин по оси x , а также скорость течения на каждом из них. Все эти данные должны считываться из файла либо задаваться в окне программы, как и некоторые другие параметры (угол склона дна реки, уклон силы трения). Также из файла считываются данные о времени (полное время T и величина дискретного участка времени dt), ширине реки, начальные условия для всех участков, а также граничные условия для первого участка на момент начала каждого момента времени t . Программа должна дать ответ на вопрос, какова скорость течения на каждом участке реки в каждый момент времени. Либо какова скорость в определенный момент времени на определенном участке реки. Ниже в материале на равных правах будут соседствовать понятия скорости течения V и расхода воды Q . Фактически, зная один из них, мы легко получаем другой из простой формулы

$$Q = V \cdot \omega, \quad (5)$$

где ω – площадь сечения реки на данном участке.

В настоящей постановке задача заключалась в расчете движения водных масс вдоль по руслу. Как отмечалось выше, русло разбивалось на N характерных участков, в пределах которых гидравлические характеристики неизменны, следовательно, алгоритм трансформации следует повторять одновременно (параллельно) для всех участков. Это главный принцип параллельности решаемой задачи. Следует отметить, что в реальных речных руслах одновременное перемещение объемов воды происходит не только на участках, но и во всех точках между верхним и нижним створами. Приближение к соблюдению одновременности развития процесса в пространстве применяется в моделях со сложными граничными условиями. В этом случае за каждый расчетный временной интервал алгоритм выполняет расчет по уравнениям сохранения массы и количества движения во всех точках русла. В нашем случае в этом нет необходимости ввиду простоты граничных условий. Задача предусматривает полную трансформацию паводочной волны вначале на первом, затем на втором и последующих участках. Это наиболее эффективный в смысле скорости выполнения алгоритм. В параллельной задаче расчет трансформации волны ведется одновременно для N участков, число которых равно числу процессоров. Нулевой процесс, иницииро-

ванный на 1-м процессоре, связан с трансформацией за интервал dt на нулевом участке входного расхода Q_{IN0} в выходной расход Q_{OUT0} , который затем с помощью неблокирующей передачи пересылается 1-му процессу, инициированному соответственно на 2-м процессоре, и присваивается переменной Q_{IN1} как входной расход для первого участка. Процесс 1 трансформирует Q_{IN1} в Q_{OUT1} – и так далее до Q_{OUTN} . Расчет ведется для всех dt из временного интервала T , необходимого для полной трансформации входного расхода в реке.

Каждый поток, как только он рассчитал выходное значение расхода или скорости воды (равносильность этих величин поясняется выше), готов принять новое входное значение расхода от предыдущего потока, которое будет соответствовать следующему моменту времени. При таком распределении расчетных работ между потоками каждый из них работает как конвейер. Очередной поток выводит информацию о выходном значении, которое он рассчитал. Поток, которому достался последний характерный участок реки, рассчитанное значение никому не передает.

Необходимо решить уравнение (3) относительно функции V . Представим всю совокупность характеристических участков реки в виде пространственно-временной сетки. Поскольку известны начальные и левые граничные значения, данная задача полностью подходит для ее

аппроксимации левым уголком. Точкой аппроксимации становится V_m^n , а все уравнение принимает вид:

$$\frac{V_m^n - V_m^{n-1}}{dt} + V_m^n \frac{V_m^n - V_{m-1}^n}{dx} + g \frac{h_m - h_{m-1}}{dx} + \frac{V_m^n \cdot q}{\omega} = g(I - I_t). \quad (6)$$

После получается квадратное уравнение относительно неизвестной V_m^n :

$$A \cdot V_m^{n2} + B \cdot V_m^n + C = 0, \quad (7)$$

где: $A = dt$ (8),

$$B = dx - V_{m-1}^n \cdot dt + \frac{q \cdot dxdt}{b \cdot h_m}, \quad (9)$$

$$C = g((h_m - h_{m-1})dt - (I - I_t)dxdt) - V_{m-1}^{n-1}dx, \quad (10)$$

где b – ширина речного русла. В нашем случае для упрощения мы считаем ширину одинаковой на всем протяжении реки.

Решая его, получим два теоретически возможных решения, из которых, естественно, берем лишь одно, где дискриминант положителен, поскольку неотрицательность этого решения более вероятна. Именно этот результат мы запоминаем, выводим и передаем на вход следующему потоку.

Окно разработанной программы представлено на рисунке 3.

Как видно, все окно явно поделено на две части. Слева находится панель управления исходными данными задачи, а справа – результатами. Сразу при запуске программа заполняет все ячейки исходных параметров (среди которых также и часть сетки результатов, в которой находятся начальные и граничные условия) значениями по умолчанию. Также есть возможность считать данные из файла («Считать данные») или просто заполнить их вручную. В любой момент можно вернуть к значениям по умолчанию с помощью кнопки «Сброс». При нажатии на кнопку «Выполнить расчет» активизируется вся расчетная часть программы. В это время все потоки работают над вычислением скоростей течения на участках реки и выводят их в расчетную сетку. По окончании процесса (рис. 3) имеется возможность в удобном виде сохранить все результаты в файл, который, в свою очередь, может интегрироваться в ГИС.

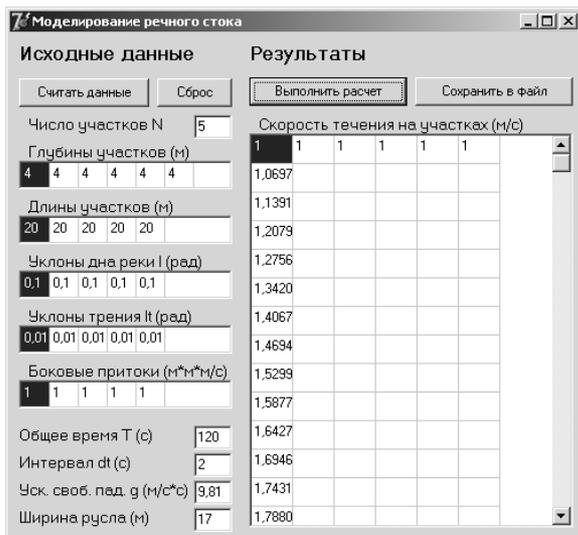


Рисунок 3. Окно разработанного приложения

12.05.2010

Список использованной литературы:

1. Хромых В.В., Хромых О.В. Морфометрический анализ долины Томи на основе ArcGIS 3d Analyst и Spatial Analyst // Материалы XII международной конференции пользователей программных продуктов ESRI и Leica Geosystems в России и странах СНГ. – М., 2006. С. 14-17.
2. Влацкий В.В. Анализ рельефа и гидрологической сети Оренбургской области с применением ГИС-технологий // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Управление водными ресурсами речных водосборов. Том 2. – Пермь 2009. – С. 37-41.
3. Бут Б. ArcView 3D Analyst. Руководство пользователя. М.: Дата+. - 244 с.
4. Орлова Е.В. Определение географических и гидрологических характеристик водных объектов с использованием ГИС-технологий / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Спб., 2008. 27 с.
5. Линсли Р.К. Модели «осадки – сток» // Системный подход к управлению водными ресурсами / Под ред. А. Бисваса. М.: Наука, 1985. С. 25-59.

Сведения об авторе:

Влацкий Валерий Викторович, научный сотрудник отдела геоэкологии
Оренбургского отделения УрО РАН
460014, г. Оренбург, ул. Набережная, 29, тел. (3532)770656, e-mail: mois@mail.osu.ru

Vlatskiy V.V.

The simulation of river drain with help of GIS-technologies

The work is dedicated to the task of the simulation of the river drain of the ponds of the rivers of the Urals and Sakmara of Orenburg region. The procedure of the use of Gis- technologies for the definition of the characteristics of aqueous objects and visualization of the results of simulation is represented.

The key words: river drain, relief, mathematical model, geo-information systems, program set.

Bibliography:

1. Khromykh V.V., Khromykh O.V. Morphometric analysis of the valley Tomi based ArcGIS 3d Analyst and Spatial Analyst // Proceedings XII International User Conference ESRI software and Leica Geosystems in Russia and CIS countries. – М., 2006. с 14-17
2. Vlatsky V.V. Analysis of the topography and hydrological network of the Orenburg region using GIS technology. // Modern problems of reservoirs and their watersheds. Water management of river catchments. Volume 2-Perm 2009. – С 37-41
3. Booth B. ArcView 3D Analyst. Manual. М.: Date +. -244 Pp.
4. Orlova E.V. Determination of geographical and hydrological characteristics of water bodies using GIS technology / dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, St. Petersburg, 2008. 27 pp.
5. Linsley R.K. Models «rainfall – runoff» // systems approach to water resources management, Ed. A. Biswas. М.: Nauka, 1985. с 25-59.