

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАТОПЛЕНИЙ В ГОРОДЕ ПРИ ЛИВНЕВЫХ ДОЖДЯХ С ПОМОЩЬЮ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ. I

А.К. Гуц

д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: aguts@mail.ru

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр
Российской академии наук», Сочи, Россия

Аннотация. Решается задача моделирования ливневых дождевых затоплений в городе. Рассматриваются известные методы решения данной задачи: 1) классический гидродинамический, опирающийся на уравнения Навье – Стокса или на уравнения Сен-Венана; 2) основанный на теории клеточных автоматов; 3) с привлечением машинного обучения. Предложен алгоритм работы соответствующего клеточного автомата, оценена его эффективность. Приведён план создания программного приложения.

Ключевые слова: модель, город, затопление, ливневый дождь, клеточные автоматы, алгоритм.

Введение

Важной проблемой в местностях, подверженных ливневым дождям, является моделирование того, как вода течёт по местности, создавая затопления, образуя каналы и заполняя впадины.

Сочи является городом, расположенным в горной местности, который подвергается частым ливневым дождям. Очевидно, что есть необходимость в точных прогнозах, говорящих о том, где и насколько сильно будут затоплены те или иные территории города.

На сегодня в науке используются следующие подходы для решения данной задачи:

– *Физическое моделирование*, основанное на численном решении уравнений гидродинамики Навье – Стокса. Однако при выявлении затоплений в городе исследователи уделяют внимание таким деталям, как придорожные каналы, бордюры [1], которые, скорее всего, не могут быть учтены при физическом моделировании.

– *Моделирование в рамках теории клеточных автоматов*. Здесь основным является сток воды под действием гравитации. Возможен учёт мелких городских деталей, которые стоят на пути потоков воды. Особо выделяется

моделирование на основе триангулируемых поверхностей [2, 6], поскольку требует меньших затрат ресурсов вычислительной техники и способно наилучшим образом учитывать многие детали местности.

– *Методы машинного обучения*, которые в последнее время становятся достаточно популярными. Но здесь необходимо иметь исторические данные по предыдущим бедствиям.

Начиная с 2010 года для моделирования поверхностного стока вместо разностных схем решения систем дифференциальных уравнений в частных производных Навье – Стокса или Сен-Венана стали применять теорию клеточных автоматов [2, 4, 6–9, 11–15, 17]. Клеточный автомат состоит из конечного числа элементов, называемых ячейками, состояние которых синхронно изменяется во времени по заданным правилам.

«При использовании цифровой модели рельефа в виде набора высотных отметок, расположенных в узлах регулярной прямоугольной сетки, для моделирования стока воды по земной поверхности узлы сетки интерпретируются как центры независимых дискретных горизонтальных областей с заданной высотой значение, а сами площади (базы конечных объёмов) совпадают с ячейками клеточного автомата» [17].

В этой статье мы предлагаем такой алгоритм расчёта зон затопления для города, расположенного в горной прибрежной местности M , который использует клеточный автомат. Для представленной в виде сети клеток местности (*цифровой модели местности* (ЦММ)) и по заданному распределению осадков в виде дождя $H(t)$, которое может меняться со временем и от клетки к клетке, определяется, сколько воды втекает в разные клетки в разные моменты времени, и тем самым выявляется полная картина затоплений.

1. Использование уравнений Сен-Венана

Уравнения Сен-Венана, получающиеся усреднением по высоте уравнений Навье – Стокса, применяются для моделирования потоков мелкой воды, когда глубина воды несравнимо меньше площади водной поверхности (где вертикальный размер намного меньше горизонтального).

Эти уравнения выписываются в двух случаях: для моделирования потоков воды в реках и каналах (1D случай) или при моделировании стока воды по склонам (2D случай).

Для случая осадков и инфильтрации двумерные уравнения мелкой воды, состоящие из уравнения неразрывности с двумя дополнительными членами и двух уравнений импульса для усреднённых по глубине потоков свободной поверхности, имеют вид [19]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - I \\ -gh \frac{\partial R}{\partial x} - S_{fx} \\ -gh \frac{\partial R}{\partial y} - S_{fy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

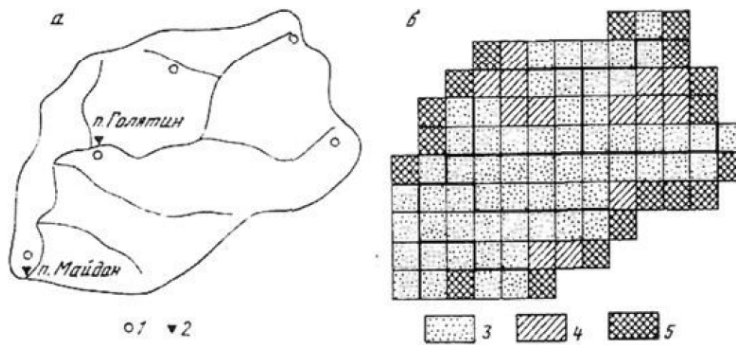


Рис. 1. Схематизация водосборной площади р. Голятинка [21]

где x и y – декартовы координаты, описывающие горизонтальную плоскость, t – время, $h(x, y, t)$ – глубина воды, $u(x, y, t)$ и $v(x, y, t)$ – две составляющие усреднённых по глубине скоростей в направлениях x и y , $R(x, y, t)$ – интенсивность дождя, а $I(x, y, t)$ – скорость инфильтрации, g – ускорение свободного падения, S_{fx} и S_{fy} – компоненты условий нелинейного трения при напряжении на дне из-за его шероховатости в направлениях x и y .

Высота водной поверхности $w(x, y, t)$ представлена таким образом, что $w = h + B$, где $B(x, y)$ – функция высоты дна, описывающая произвольную или естественную топографии, и предполагается, что отметка дна $B(x, y)$ не меняется со временем, т. е. в данном случае рассматривается стационарное дно.

Заменив глубину воды (h) на разницу высоты поверхности воды и отметки дна ($w - B$) и выполнив простые алгебраические преобразования, уравнение (1) можно переписать в терминах функции $w(x, y, t)$ [19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} w \\ hu \\ hv \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} hu \\ \frac{(hu)^2}{w-B} + \frac{1}{2}g(w-B)^2 \\ \frac{(hu)(hv)}{w-B} \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} hv \\ \frac{(hv)^2}{w-B} + \frac{1}{2}g(w-B)^2 \\ \frac{(hu)(hv)}{w-B} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} R - I \\ -g(w-B)\frac{\partial B}{\partial x} - S_{fx} \\ -g(w-B)\frac{\partial B}{\partial y} - S_{fy} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Мы видим достаточно сложные уравнения. Решаются они традиционными численными методами, посредством аппроксимации местности сетками с заменой дифференциальных уравнений разностными. Топография водосбора (местности) задаётся отметками высот в узлах расчётной прямоугольной сетки (рис. 1). Для построения сеточной функции $B_{ij}(x_i, y_j)$ используются данные дистанционного зондирования Земли, т. е. *цифровые модели рельефа* (ЦМР).

В случае ливневых дождевых затоплений прибрежных горных городов, каковым является Сочи, особенностью рассматриваемой задачи является сложный характер рельефа местности, имеющий многочисленные нерегулярные и

даже разрывные участки. Поэтому успех прогнозирования в большой степени определяется тщательным построением численного алгоритма интегрирования уравнений мелкой воды.

Примером может служить диссертация В.Н. Демидова [21], где рассматривались задачи речного паводка или наводнения либо стока под уклон. Но это частные, хотя и важные задачи, уводящие нас от решаемой нами задачи.

Известно, что физическое моделирование требует значительных ресурсов, которыми должна обладать используемая вычислительная техника.

Касательно изучаемой нами задачи затопления в работе [17] было отмечено, что «выполнение численного решения системы двумерных дифференциальных уравнений мелкой воды (Сен-Венана) в частных производных для моделирования динамики движения водных потоков по цифровым моделям рельефа, построенным на основе лазерного сканирования земной поверхности с высокой разрешающей способностью, приводит к значительному повышению вычислительной нагрузки на ЭВМ».

Для преодоления вычислительной проблемы Т.А. Дьяконова [22] использовала графические процессоры Tesla, о которых сказано, что при вычислениях достаточно обойтись персональными суперЭВМ.

Графические процессоры и технологии параллельных вычислений MPI-OpenMP-CUDA использовались и в работе [10]. Изучался прорыв плотины. Соответствующее компьютерное моделирование проводилось с использованием программно-аппаратного комплекса, позволяющего рассчитывать динамику поверхностных вод на обширной территории (500×500 км) с хорошим разрешением (10–20 м). В его состав входили: гибридная вычислительная станция на базе 4 графических ускорителей NVIDIA® TESLA Fermi C2070 6GB (1792 ядра); специализированная геоинформационная система «EcoGIS-Simulation»; параллельная CUDA-версия расчётного модуля для моделирования динамики поверхностных вод на основе алгоритма cSPH-TVD.

В настоящее время в Китае и других странах для моделирования затопления в результате ливневого дождя в городах используется модель SWMM (Storm Water Management Model = модель управления ливневыми водами), основанная на методе гидрологического анализа ГИС, численном моделировании уравнения гидродинамической силы и т. д. [3].

С точки зрения вычислительной математики решение задачи затопления участков города в горной местности на основе уравнения Сен-Венана является увлекательной задачей, но подчас при таком подходе приходится идти на значительные упрощения, которые не дадут желательно точного прогнозирования мест затопления.

2. Модель затоплений

Решаемые в статье задачи:

1. Описать модель и алгоритм нахождения мест затопления в Сочи после ливня с уровнем осадков H на базе теории клеточных автоматов.

2. Разработать программу, моделирующую наводнения с помощью алгоритма клеточных автоматов.

3. Протестировать программу на различных картах ландшафта, на картах ЦМР.

3. Теория клеточных автоматов

Клеточный автомат – дискретная модель. Основой является пространство из прилегающих друг к другу клеток, образующих решётку. Каждая клетка может находиться в одном из конечного множества *состояний*. Решётка может быть любой размерности, бесконечной или конечной, для решётки с конечными размерами часто предусматривается закольцованность при достижении предела (границы).

Для каждой клетки определено множество клеток, называемых *окрестностью*.

Устанавливаются *правила перехода* клеток из одного состояния в другое. Переходы осуществляются пошагово, т. е. время в модели течёт дискретно.

Обычно правила перехода одинаковы для всех клеток. Один шаг автомата подразумевает обход всех клеток, и на основе данных о текущем состоянии клетки и её окрестности происходит определение нового состояния клетки, которое будет у неё при следующем шаге.

Перед стартом автомата оговаривается *начальное состояние* клеток.

4. Построение клеточного автомата

4.1. Модель местности

Будем использовать растровую модель пространственных данных, касающихся изучаемой местности, которая представляет собой разбиение изображения (пространства местности) на квадратную сеть, состоящую из *ячеек*, имеющих фиксированное значение высоты в пределах одной ячейки. Иначе говоря, растровое изображение представляет собой в целом квадратную (прямоугольную) сетку, состоящую из ячеек, или *пикселей* (цветных точек-квадратов). При этом пиксель – это элемент изображения; оно из них, пикселей, состоит.

Пространственное разрешение растровой модели рельефа – это линейный размер ячейки растра, выраженный обычно в метрах.

Напомним, что пространственное разрешение – величина, характеризующая размер наименьших объектов, различимых на изображении. Говорим, что цифровое изображение имеет более высокое пространственное разрешение, чем другое изображение, если изображение с более высоким пространственным разрешением состоит из большего количества пикселей, чем изображение с более низким пространственным разрешением, при тех же размерах изображения.

Спутниковые данные ASTER GDEM и SRTM X-Band способны обеспечить разрешение рельефа местности до 20 м в плоскости Земли и до 1 м по вертикальной координате.

Очевидно, что на направления стока воды влияют городские постройки. Поэтому желательно вместо ЦМР использовать ЦММ. При этом следует помнить, что цифровые модели рельефа с грубым разрешением часто приводят к снижению точности результатов моделирования из-за потери мелкомасштабных характеристик зданий при моделировании рельефа [5]. Сетка ЦМР, используемая для моделирования рельефа, должна быть меньше, чем масштаб зданий. Это позволяет лучше описать особенности здания и поведение потока воды вокруг них.

ЦМР (= DEM) изучаемой местности, в нашем случае – города Сочи, строится с использованием данных, предоставляемых Геологической службой США (<https://earthexplorer.usgs.gov>). На данный момент мы располагаем двумя растровыми картами *Sochi.tif* (рис. 2, 3) и *Mosaic.tif*.

В топографической миссии Shuttle Radar (SRTM, НАСА) каждый пиксель спутникового изображения ЦМР соответствует ячейке квадратной формы размером в один квадратный метр (30 м).

ЦМР, или матрицу высот, можно представить в виде растра (сетка квадратов, также известная как карта высот при представлении высоты). То, насколько точно дана высота каждого пикселя, определяет качество ЦМР. Каждый пиксель хранит значение, такое как высота поверхности, и каждый пиксель спутникового изображения ЦМР соответствует ячейке поверхности квадратной формы определённой размерности, задавая разрешение (скажем, 30×30 м).

ЦМР состоит из матрицы чисел, но данные из ЦМР часто представляются в визуальной форме, чтобы сделать их понятными для пользователя. Визуализация осуществляется в виде контурной топографической карты, с цветной раскраской для визуализации высот (например, использование зелёного для самых низких отметок, заливка красным с белым для наибольшей отметки, синий для водных поверхностей – см. рис. 2, 3).

Хотя в данной работе используется регулярная растровая модель рельефа (grid, формат файлов TIF), имеется возможность основываться на *нерегулярной треугольной сети Делоне* (TIN) [2]. При таком подходе приходится особо рассматривать, как вода течёт по общим рёбрам смежных треугольных граней. В работе [1] описан процесс стока воды по местности, представленной как триангулируемая xy -поверхность с m вершинами, с изменяемым во времени распределением дождевой воды, определением количества воды, протёкшей через данное ребро как функции времени, и оценивается эффективность алгоритма ввода/вывода и стока воды для всех рёбер. Эффективность – время обчёта $O(m \log m)$.

«К достоинствам нерегулярных триангуляционных сетей при создании моделей фрагментов земной поверхности можно отнести как однозначность вычисления высоты рельефа между любыми тремя узлами TIN, так и лучшее представление сильнопересечённой местности» [8]. Но при этом проявятся следующие их недостатки: «сложная организация необходимой структуры данных и необходимость перерасчёта триангуляции при каждом изменении рельефа моделируемой территории» [8].

При создании систем прогнозирования затоплений полезно учесть следу-

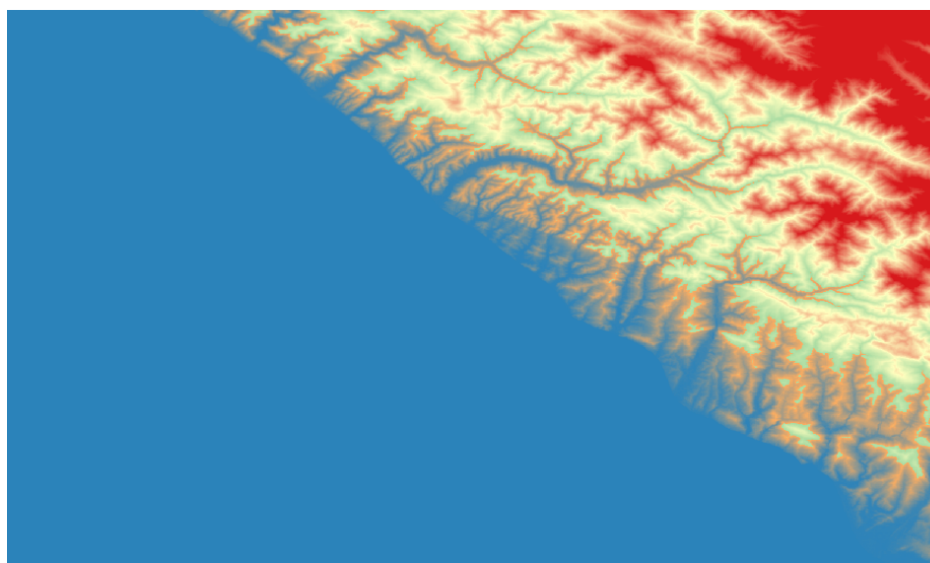


Рис. 2. 2D Цифровая модель рельефа Сочи (берег Черного моря). Высоты представлены цветом

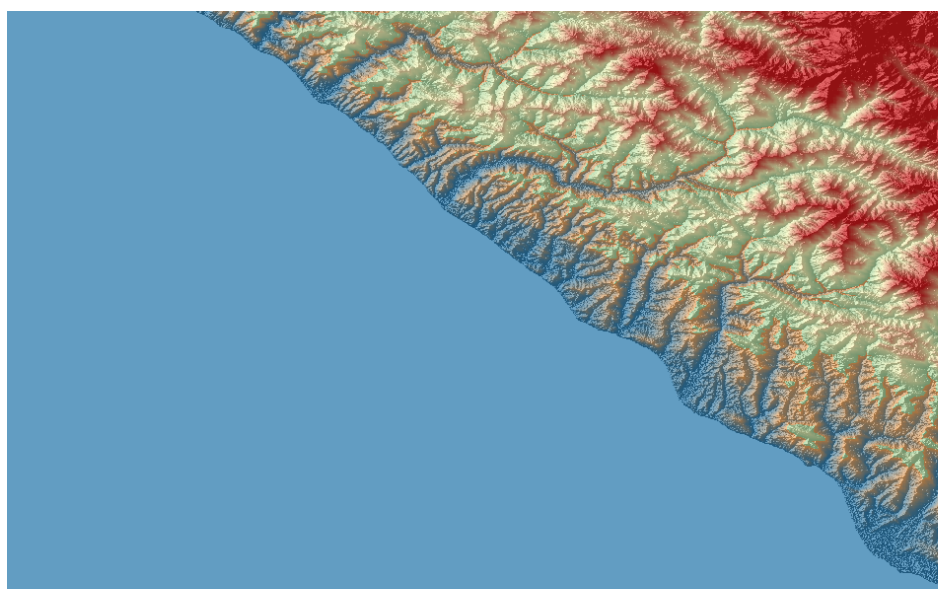


Рис. 3. 3D Цифровая модель рельефа Сочи. Высоты представлены цветом

ющие замечания И.А. Вишневской – специалиста, который поделился своим опытом создания интересных нас систем:

1. «Регулярная матрица рельефа – грид – «слепо» описывает характер рельефа местности, не отражая её индивидуальные особенности (точки перегибов склонов, экстремальные точки, овраги, промоины и т. д.), поэтому и была использована нерегулярная матрица, узлы которой располагаются на характерных

местах рельефа <...>

2. Структуры данных в TIN-моделях более компактны и экономичны: TIN-модели из сотен точек может соответствовать растровая DEM из десятков тысяч точек» [27].

4.2. Описание структуры клеточного автомата

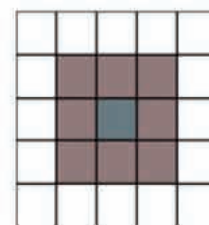
Двумерный клеточный автомат для моделирования дождевого стока, который представляет собой набор из $K_i, i = 1, \dots, N$, элементов, называемых клетками (ячейками), размещение которых совпадает с расположением элементов квадратной сети цифровой модели рельефа, на которой выпадают жидкие осадки в виде дождя.

Осадки измеряем как столб воды $H_n(K_i)$ на квадратной клетке (ячейки) на момент $n = 0, 1, 2, \dots$, за разное время, которое может быть днями и неделями.

Мы можем считать, что дождь выпал одновременно в каждой клетке и имеет там высоту столба воды H , т. е. $H_0(K_i) = H$ для каждого i . Возможно усложнение модели, когда столб воды в каждой клетке задаётся отдельно. Но это увеличивает время расчёта.

Конфигурация клеточного автомата также загружается перед процессом моделирования. Затем к спутниковому снимку ЦМР применяются установленные правила клеточного автомата, выполняющего полную симуляцию выбора осадков, при этом используется столько итераций, сколько необходимо для того, чтобы вода падала и накапливалась на нижних уровнях трёхмерного спутникового изображения.

Состояние каждой клетки K_i в момент n клеточного автомата характеризуется двумя параметрами: исходной высотой $h(K_i)$ соответствующего пикселя матрицы высот (параметр 1) и уровнем $s_n(K_i)$ столба воды в ней на момент дискретного времени n (параметр 2). Подчас под состоянием клетки будем иметь в виду только параметр $s_n(K_i)$.



Окрестность Мура

Наш клеточный автомат может быть определён как математическая структура

$$KA = \langle d, Ne, Q, \#, V, f \rangle =$$

$$= \langle 3, \{8\}, [\text{высота, столб воды}], [\text{ЦМР_alt, initial_water}], V, f \rangle,$$

где

$d = 3$ – пространственная размерность клеточного автомата, равная 3, поэтому клетки (ячейки) распределяются в трёхмерной форме;

$Ne = \{8\}$ – окрестность Мура;

$Q = [h(-), s_n(-)]$ – состояние клетки; каждая клетка имеет набор из двух параметров – высоты местности и уровня воды;

$\# = [\text{ЦМР_alt, initial_water}]$ – исходное, или начальное состояние клеток: высота и столб воды;

$V(K_i)$ – вид окрестности клетки K_i ;

$s_n(K_i) = f(s_{n-1}(K_j) : K_j \in V(K_i))$ – правила, определяющие состояние клетки в момент n .

5. Алгоритм клеточного автомата

Для детального моделирования городских затоплений / наводнений подходит ЦМР с высоким разрешением.

В случае, когда важно учитывать городские застройки, надо вместо ЦМР использовать ЦММ Сочи с морем с матрицей высот (DTM).

ЦМР в этом случае – это сетка S , состоящая из клеток $\langle \{K_i\}, h(K_i) \rangle$ с отметками высот $h(K_i)$.

Можно использовать любую карту ландшафта Сочи с сеткой, где для каждой клетки указана её высота над уровнем моря. Всё зависит от той степени точности прогноза затопления, который востребован на данный момент.

Алгоритм клеточного автомата состоит из перечисления правил переходов от шага к шагу, задания начальных условий и описаний конкретных шагов. Перечислим их.

1. Время дискретное: $n = 0, 1, 2, \dots, N$, N – число шагов программы. На шаге N выводим на экран карту затоплений. Программу можно запустить вновь, используя данные шага N . Если карта затоплений существенно не изменится, то Stop – конец работы.

2. Задаём величину осадков $H = mh$, т. е. числа h и $m \geq 8$.

3. Соседними клетками для клетки считаем клетки, имеющие с ней общую вершину или ребро. Это так называемая окрестность Мура. Таких восемь, кроме тех клеток, которые находятся на границах сетки (эти клетки оговариваем особо; у них меньше соседних – 3 или 5).

4. Принимается концепция плоской воды, которая предполагает, что поверхность скопившейся воды горизонтальна (градиент $R = 0$, где R – высота поверхности воды) [2]. Основанием для этого служат следующие соображения. Данная концепция является просто полезной для разработки GIS-моделей затопления городов «из-за отсутствия подробной гидрологии наводнений для большинства городских районов. Модель плоской воды подходит для мест, где недоступны топографические данные высокого разрешения и/или гидравлическая модель затопления суши» [23].

Концепция плоской воды является в какой-то мере вынужденным решением для моделирования ливневого стока, особенно для мест, где отсутствуют гидравлические модели затопления на суше, а это места с трудной конфигурацией дна и его мелких деталей.

5. Поскольку городские поверхности в основном состоят из непроницаемых слоев (в Сочи улицы и дороги асфальтированы и забетонированы), то инфильтрацию¹ воды на первом этапе моделирования не будем учитывать.

¹Инфильтрация – это процесс впитывания воды в толщу грунта до полного его насыщения.

6. Состояние клетки на шаге n обозначим как $s_n(K_i)$. Оно равно высоте столба воды в клетке. На каждом шаге столб воды в клетке меняется.

7. Клетки K_i , не соответствующие морю, на начальный момент $n = 0$ получают столб воды H , т. е. $s_0(K_i) = H$. Для морских клеток K_j считаем, что $s_0(K_j) = 0$.

8. Минимальная передача/отдача воды соседней клетке на каждом шаге равна h , $H = mh > 0$, $m \geq 8$ – заданное число, характеризующее уровень осадков. (Число m может зависеть от клетки, $m = m(K_i)$. Таким образом можно уточнять уровень осадков в разных частях города.)

9. Состояние морской клетки всегда 0. Вода, влившаяся в морскую клетку K_i из клетки на суше, сразу же на этом шаге факторизуется, и принимается, что всегда $s_n(K_i) = 0$. Ей придаётся тёмно-синий цвет.

10. Шаг 0. Полагаем для всех i $s_0(K_i) = H$ с учётом пункта 9.

11. Пусть сделан шаг n .

12. Полагаем, что на шаге $n + 1$

$$s_{n+1}(K_i) = H - k_i h + l_i h, \tag{2}$$

где

k_i – число соседних клеток K_j с K_i , таких, что $h(K_i) > h(K_j)$, если у K_i есть, что слить;

l_i – число соседних клеток K_j с K_i , таких, что $h(K_j) > h(K_i)$, если у K_j есть, что слить.

Поскольку состояния клеток в автоматах меняется одновременно, то по формуле (2) за шаг из клетки в соседнюю нижнюю клетку выливается только h воды. Всего за шаг вылиться может только ph воды, где p ($0 \leq p \leq 8$), где p – число более низких клеток. А влиться может больше, чем h , точнее, qh , где q – число более верхних клеток; за исключением случая, когда верхние клетки уже не имеют воды.

При программировании делаем обход клеток и вначале выливаем из клетки, а потом в неё вливаем.

Если соседняя клетка K_j имеет ту же высоту, что и та – K_i , из которой выливаем, то в неё вода из K_i не вливается.

13. Могут существовать компактные впадины (depressions), ямы, состоящие из конечного числа клеток, по периметру которых находятся клетки с большей высотой. Впадины могут быть односвязными, т. е. внутри них нет клеток с большей высотой, и неодносвязными, если таковые имеются.

Как только впадины заполнятся водой и уровень воды в них сравняется с уровнем воды у соседних клеток, они все вместе начнут одновременно принимать воду (от тех, что выше) или отдавать (тем, что ниже).

Следует вести учёт впадин. Впадины будут наполнены водой после прекращения дождя – они на местности являются местами постоянного/долгого затопления.

14. Для граничной клетки карты визуализация такова: если в неё вливается вода и ничего не выливается (могло бы вылиться за пределы карты, но карта обрезана), то её красим в чёрный цвет, который говорит о неточности расчёта для этой клетки.

15. Пусть $R(K_i, n)$ – количество (столб) воды, влившейся в клетку K_i в момент времени n , т. е на шаге n :

$$R(K_i, n) = H + \sum_0^n (s_n(K_i) + k_i h),$$

где k_i – число соседних клеток K_j с K_i , таких, что $h(K_i) > h(K_j)$, если у K_i есть, что слить.

16. Для впадины β определяем

$$R(\beta, n) = \sum_{K_i \subset \beta} R(K_i, n) -$$

столб воды, влившейся на шаге n , во впадину.

Можно сосчитать объем воды, влившейся во впадину за всё время:

$$R(\beta) = \sum_{n=0}^{n_{stop}} R(\beta, n),$$

где n_{stop} – последний шаг. Данное количество можно визуализовать, придавая клетке соответствующий цвет.

Величины R позволяют нам понять, где в городе скапливаются большие объёмы воды.

17. При визуализации мы придаём цвет клеткам. Возможны два варианта.

Вариант 1.

Затопленная клетка – это та, для которой $s_n(K_i) > 0$. Её в компьютерной реализации закрасим в синий цвет.

У незатопленной клетки $s_n(K_i) = 0$. Её красим в белый цвет.

Это очень простой вариант, не учитывающий глубины затопления.

Вариант 2.

Вводим понятия глубины затопления = mh , ($m = 0, 1, \dots$) клетки. При $m = 0$ – сухая клетка. Её красим в цвет от зелёного через жёлтый к красному – чем выше, тем ближе к красному.

При $m > 0$ – влажная клетка, цвет – оттенки синего. Чем больше глубина, тем темнее цвет, от светло-голубого до темно-синего и даже чёрного.

Для реализации второго варианта задаём шкалу цветов, зависящую от столба затопления.

Очевидно, предложенный алгоритм претерпит изменения в ходе программирования и тестирования программы.

6. Оценки эффективности алгоритма

Теория клеточных автоматов часто применяется в гидродинамике, особенно в расчётах наводнений и затоплений. Здесь не нужны уточнения скоростей течений, завихрений и пр. Вычислительно, тем не менее, модели затоплений на основе клеточных автоматов могут быть не менее сложными, чем численные модели на основе уравнений Навье – Стокса, поскольку обчёты идут на каждом шаге и для каждой клетки.

Например, для сетки города Сочи *Sochi.tif* (рис. 2, 3) имеем $1920 \times 1200 = 2\,304\,000$ пикселей, или клеток, для клеточного автомата. Поэтому нужно провести как минимум $2\,304\,000$ вычислений на каждом шаге, и с учётом 100 шагов потребуется провести $230\,400\,000$ вычислений. При этом необходимо хранить данные по клеткам, т. е. $2\,304\,000$ высот и $2\,304\,000$ столбов воды.

Даже если учесть, что половина пикселей приходится на море, то всё равно $115\,200\,000$ вычислений – это довольно внушительное число.

Для сетки ЦМР побережья Сочи *Mosaic.tif* имеем $10800 \times 7200 = 77\,760\,000$ пикселей, или клеток, для клеточного автомата. Следовательно, нужно провести как минимум $77\,760\,000$ вычислений на каждом шаге, а с учётом числа шагов, скажем 100, требуется провести $777\,600\,000$ вычислений. При этом необходимо хранить данные по клеткам, т. е. $77\,760\,000$ высот и $77\,760\,000$ столбов воды.

Число клеток, или пространственная разрешимость ЦМР, определяет точность получаемой карты затоплений. Чем их больше, тем она точнее, но одновременно более вычислительно затратна, и нужно подумать, а тот ли у нас компьютер, на котором мы собрались провести моделирование.

7. Дальнейшая работа

Пишем программу, которая по шагам представляет ситуацию с затоплением реализую алгоритм, описанный в разделе 5. Сама программа не слишком сложная, но требуется организовать ввод/вывод данных – сетку города с высотами и визуализировать вывод.

После этого проводим компьютерные эксперименты с разными H и h . Смотрим, делаем выводы, вносим исправления в алгоритм.

8. Машинное обучение

Физические модели показали большие возможности для прогнозирования самых разнообразных сценариев затоплений / наводнений. Но они, как правило, часто требуют различных типов наборов данных гидрогеоморфологического мониторинга, что предполагает интенсивные вычисления, к чему добавляются временные затраты на вычисление самого прогноза. Всё это приводит к тому, что краткосрочное прогнозирование становится невозможным [24].

В последние годы было показано, что решения, основанные на *машинном обучении*, очень часто превосходят методы, основанные на физическом моде-

лировании, которые обычно, как уже было отмечено, требуют много времени на подготовку прогноза.

Машинное обучение – это область искусственного интеллекта, которую используют для выявления закономерностей и создания шаблонов, обеспечивающих более простую реализацию задуманного с низкими вычислительными затратами. При этом многие методы и алгоритмы машинного обучения делают возможными краткосрочные прогнозы затоплений.

Метод машинного обучения – это алгоритм, который оценивает неизвестное до сих пор взаимоотношение (или зависимость) между входами системы и её выходами на основе имеющихся данных [25].

Выделим в этой связи нейронные сети с многослойными персептронами (MLP). Это класс нейронных сетей с обратной связью, которые используют контролируемое обучение для обучения сети взаимосвязанных узлов нескольких слоёв. Простота, нелинейная активация и большое количество слоёв являются характеристиками MLP. Благодаря этим характеристикам модель широко используется для прогнозирования наводнений. Они при моделировании наводнений оказались более эффективными, обладающими лучшей способностью к обобщению [24].

Для нас основной задачей является построение нейронной сети, способной прогнозировать затопление в городе, расположенном в горах, в случае многодневного ливневого дождя.

Разработка такого алгоритма на базе нейронных сетей (или иных направлений машинного обучения) предполагает:

- 1) умение строить хорошие цифровые модели рельефа местности, т. е. ЦММ (= DTM);
- 2) организацию сбора исторических данных по уровням воды в разных точках города и протекающих по нему рек (необходимо иметь для обучения сети);
- 3) мониторинг информации о погоде в регионе (для модификации вводных данных о дожде).

На основе этих данных, как было сказано, проводится обучение нейронной сети. Как результат, получают устройство, делающее предсказания.

Предсказания с помощью машинного обучения в начале пути; оно требует особого внимания к процессу обучения. Например, при анализе работы одного из таких устройств было замечено, что сеть часто, вычисляя уровень воды на конкретном участке местности, не уточняет детали, а копирует ранее вычисленный результат по «похожему» участку местности. Как результат, получался ошибочный прогноз. Естественно, обучение сети усложнили.

Нейронные сети не единственный метод в машинном обучении, и, скорее всего, в ближайшем будущем появятся и другие модели прогнозирования затопления городов при ливневых дождях.

9. Заключение

В статье мы не только изложили алгоритм работы компьютерного приложения на базе клеточных автоматов, прогнозирующий затопления города, но и представили иные, альтернативные подходы.

Предложенный в статье алгоритм не является единственно возможным. В литературе можно найти и другие алгоритмы, основанные на той или иной модели затопления. Но каждая из этих моделей и соответствующий алгоритм привязаны к конкретному ландшафту, к конкретной задаче затопления, чаще всего к разливам рек. Искать универсальный алгоритм, пригодный для любой местности и любой картины затопления, можно, но, скорее всего, он не будет желанным там, где насущной является задача *предельно точного* предсказания наиболее проблемных мест затопления. В нашем случае – это затопления в Сочи при долгих ливневых дождях, которые уже привели к человеческим жертвам.

Алгоритмы, опирающиеся на теорию клеточных автоматов, видятся сегодня как наиболее быстро ведущие к цели – созданию систем прогнозирования зон затопления.

Конечно, в последнее время модели с использованием искусственного интеллекта становятся всё более популярными, но больше всё-таки пока используются либо физическое моделирование, либо модели с клеточным автоматом. Первое, однако, требует высокой математической квалификации в области гидродинамики и вычислительной математики, а также хорошей программистской квалификации от разработчиков, но сторонники этого направления пока больше обращали внимание на паводки, наводнения после выхода реки из берегов, прорывы плотин, чем на затопления при ливневых дождях.

Модели же, основанные на клеточных автоматах (впрочем, как и на машинном обучении), больше нуждаются в хороших программистах; здесь задачи прогнозирования затоплений при ливневых дождях решаются гораздо чаще.

10. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания «Эволюция окружающей среды и климата вследствие естественных причин и антропогенного воздействия» (FGRW-2021-0015, № государственной регистрации 122032300363-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Lowe A., Svendsen S.C., Agarwal P.K., Arge L. 1D and 2D Flow Routing on a Terrain. arXiv:2009.08014v1 (2020).
2. Li Z., Wu L., Zhu W., Hou M., Yang Y., Zheng J. A New Method for Urban Storm Flood Inundation Simulation with Fine CD-TIN Surface // Water. 2014. V. 6. P. 1151–1171. doi:10.3390/w6051151.
3. Urban area water logging flood processing simulation method based on CD-TIN. URL: <https://patents.google.com/patent/CN103116695A/en> (дата обращения: 01.03.2023).

4. Бабух А.И., Бавченков А.Г. Клеточный автомат для моделирования затопления улично-дорожной сети // Современные проблемы математики и вычислительной техники: сб. материалов XI Республик. науч. конф. молодых учёных и студентов, Брест, 21–22 ноября 2019 г. Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет. Брест: БрГТУ, 2019. С. 63–66.
5. Shen J., Tan F. Effects of DEM resolution and resampling technique on building treatment for urban inundation modeling: a case study for the 2016 flooding of the HUST campus in Wuhan // *Natural Hazards*. 2020. V. 104. P. 927–957.
6. Компьютерное моделирование наводнений. URL: <http://itrobo.ru/modelirovanie/nauka/kompyuternoe-modelirovanie-navodnenii.html> (дата обращения: 01.03.2023).
7. Петров Д.О., Волчек А.А., Костюк Д.А., Шешко Н.Н. Система расчета и визуализация зоны затопления на основе клеточного автомата // Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. году науки в Респ. Беларусь: в 2 ч., Брест, 25–27 сентября 2017 г. Брест: БрГУ, 2017. Ч. 1. С. 145–148.
8. Волчек А.А., Петров Д.О. Концептуальные методы моделирования затопления речных пойм на основе их геометрических параметров // *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021. № 1. С. 77–83.
9. Петров Д.О. Алгоритмическое и программное обеспечение прогнозирования наводнений на равнинных реках: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Минск, 2019. 23 с.
10. Дьяконова Т.А., Храпов С.С., Агафонникова Е.О. Компьютерное моделирование динамики затопления территорий вследствие прорыва плотины Волжской ГЭС с использованием технологий параллельных вычислений MPI-OpenMP-CUDA // *Кибернетика и программирование*. 2016. № 3. С. 17–34.
11. Dottori F.A., Todini E. 2d flood inundation model based on cellular automata approach // XVIII International Conference on Water Resources, Barcelona, Spain, June 21–24, 2010. International Centre for Numerical Methods in Engineering, 2010. P. 1–8.
12. Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata / L. Liu [et al.] // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2015. No. 15. P. 381–391.
13. A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis / M. Guidolin [et al.] // *Environmental Modelling & Software*. 2016. No. 84. P. 378–394.
14. Cirbus J., Podhoranyi M. Cellular Automata for the Flow Simulations on the Earth Surface, Optimization Computation Process // *Appl. Math. Inf. Sci.* 2013. V. 7, No. 16. P. 2149–2158.
15. Espinola M., Piedra-Fernández J.A., Ayala R., Iribarne L., Leguizamón S., Wan J.Z. Simulating rainfall, water evaporation and groundwater flow in three-dimensional satellite images with cellular automata // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2016. V. 67. P. 89–99.
16. Барка Д., Криски Г.М., Грегорио С.Д., Николетта Ф. Клеточные автоматы для моделирования лавовых потоков: метод и примеры извержений Этны // *Теория переноса и статистическая физика*. 1994. Т. 23. С. 195–232.
17. Volchak A.A., Kostiuk D.A., Petrov D.O., Sheshko N.N. Rain surface runoff modeling using cellular automaton // *Vestnik of Brest State Technical University*. 2021. No. 3. P. 88–91.

18. Stamellou E., Kalogeropoulos K., Stathopoulos N., Tsesmelis D.E., Louka P., Apostolidis V., Tsatsaris A. A GIS-Cellular Automata-Based Model for Coupling Urban Sprawl and Flood Susceptibility Assessment // *Hydrology*. 2021. V. 8. P. 159.
19. Singh J., Altinakar M. S., Ding Y. Numerical modeling of rainfall-generated overland flow using nonlinear shallow-water equations // *Journal of Hydrologic Engineering*. 2015. V. 20, No. 8. P. 04014089.
20. Fernandez-Pato J., Caviedes-Voullieme D., Garcia-Navarro P. Rainfall/runoff simulation with 2d full shallow water equations: Sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters // *Journal of Hydrology*. 2016. V. 536, No. 1. P. 496–513.
21. Демидов В.Н. Численное моделирование процессов формирования дождевого стока: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2007. 22 с.
22. Дьяконова Т.А. Математическое обеспечение для численного моделирования динамики поверхностных вод на неоднородном рельефе местности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2018. 23 с.
23. Jian Chen J., Hill A.A., Urbano L.D. A GIS-based model for urban flood inundation // *Journal of Hydrology*. 2009. V. 373. P. 84–192.
24. Mosavi A., Ozturk P., Chau K.W. Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review // *Water*. 2018. V. 10, No. 11. P. 1536.
25. Соломатин Д.П., Морейдо В.М. Методы машинного обучения и гибридные модели в гидрологическом прогнозировании. Практикум М. : Институт водных проблем Российской академии наук, 2020.
26. Gold A. About R package that estimates the impacts of downstream flooding on stormwater networks. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.761162ec-64009ef2-21eed815-74722d776562/https/github.com/acgold (дата обращения: 01.03.2023).
27. Вишневецкая И.А. Компьютерная технология оценки зон затопления при наводнениях: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2006. 145 с.

ALGORITHM OF SIMULATION OF FLOODING IN THE CITY DURING STORM RAINS WITH THE HELP OF CELLULAR AUTOMATA. I

A.K. Guts

Dr.Sc. (Phys.-Math.), Leading Researcher, e-mail: aguts@mail.ru

Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

Abstract. The problem of modeling rain floods in the city is solved. There exist the known methods for solving given problem: 1) classical hydrodynamic based on the Navier – Stokes equations or the Saint-Venant equations; 2) based on the theory of cellular automata; 3) using machine learning. An algorithm for the operation of the corresponding cellular automaton is outlined, and its efficiency is evaluated. The plan of the creation of software application is given.

Keywords: model, city, flooding, heavy rain, cellular automata, algorithm.

Дата поступления в редакцию: 11.03.2023