



УДК 004.043:004.021:556

**А.В. Бойко**, аспирант, **М.И. Железняк**, канд. физ.-мат. наук  
Ин-т проблем математических машин и систем НАН Украины  
(Украина, 03187, Киев, пр-т Глушкова, 42,  
тел. (050) 3878255, e-mail: alexb@env.com.ua)

### **Технология параллельной обработки пространственно распределенной информации в модели стока речного водосбора**

Возрастающие вычислительные мощности и развитие информационных технологий дают возможность использовать многопроцессорные системы для расчетов широкого класса гидрологических задач. Предложен метод параллельного решения уравнений распределенной модели речного стока, основанный на теории бинарных деревьев. Водосбор представлен в виде бинарного дерева, узлы которого являются независимыми подводосборами, что позволяет выполнять расчеты на многопроцессорных системах. Эффективность параллельной модели проанализирована на примере расчета паводочного стока водосбора реки Уж (Закарпатская обл., Украина).

Зростаючі обчислювальні потужності і прогрес в інформаційних технологіях надають можливість використання багатопроцесорних систем для розрахунків широкого класу гідрологічних задач. Запропоновано метод паралельного розв'язку рівнянь розподіленої моделі річкового стоку, базований на теорії бінарних дерев. Водозбір представлено бінарним деревом, вузли якого є незалежними підводозборами, що дозволяє виконувати розрахунки на багатопроцесорних системах. Ефективність паралельної моделі стоку проаналізовано на прикладі розрахунку паводочного стоку водозбору річки Уж (Закарпатська обл., Україна).

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* моделирование паводков, распределенные модели стока, параллельные вычисления, информационные технологии.

В 80-е годы прошлого века для гидрологических прогнозов начали использовать новый класс моделей расчета стока воды с речного водосбора — моделей с распределенными параметрами [1—3]. В моделях такого типа водосбор представляется сеткой пространственных элементов — ячеек, между которыми задана однозначная связь. Для прямоугольной сетки сток из ячейки поступает только в одну из восьми соседних ячеек. При такой схематизации потоков на водосборе согласно теории структур данных водосбор имеет вид несбалансированного (нерегулярного) дерева с корнем в замыкающем створе водосбора (рис. 1). Каждой ячейке во-

© А.В. Бойко, М.И. Железняк, 2015

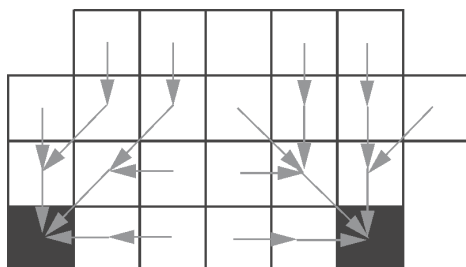


Рис. 1. Схематическое изображение дерева стока: черные квадраты — замыкающие створы

досбора присваивается набор параметров модели, значения которых получают из карт высот, типов почв, растительного покрова и других источников [4], а расчет стока выполняется посредством решения уравнений модели для каждой ячейки и передачи рассчитанных потоков воды в ячейки, расположенные ниже по склону.

В распределенных моделях учитывается пространственная неоднородность гидрологических и метеорологических процессов, происходящих на водосборе, и при явном описании физических процессов распределения стока по водосбору используется меньшее число эмпирических параметров [1—3]. Использование таких моделей стало возможным только после появления геоинформационных систем (ГИС), позволяющих оперировать большими объемами картографической информации, и создания цифровых карт необходимого пространственного разрешения для большого числа речных водосборов [5].

Решение уравнений модели для каждой ячейки на каждом шаге моделирования — ресурсоемкая задача, особенно для водосборов большой площади (от 1000 км<sup>2</sup>). Время расчетов можно значительно уменьшить, используя методы параллельных вычислений для высокопроизводительных многопроцессорных систем [6], что особенно важно для моделирования многолетних рядов стока при исследованиях долгосрочных климатических изменений гидрологического режима рек. Проведение расчетов для больших водосборов в сжатые сроки является необходимым условием и для использования распределенных моделей в оперативном прогнозировании паводков.

Расчет стока с произвольной ячейки водосбора или речной сети в момент  $T$  строго зависит от рассчитанного стока всех его элементов, находящихся вверх по склону или течению реки (согласно дереву стока). Следовательно, до тех пор пока не будет рассчитан сток во всех вышележащих ячейках, расчет для текущей ячейки невозможен. Для реализации параллельных алгоритмов необходимо искать способы пространственной декомпозиции водосбора на независимые ячейки или их группы.

Способы декомпозиции можно условно разделить на два типа, а именно способы сильносвязанной декомпозиции (*closely coupled*) [7] и слабо-связанной (*loosely coupled*) [8]. В случае сильносвязанной декомпозиции в процессоры последовательно загружаются данные для каждой ячейки во-

досбора. Такой подход решает поставленную задачу, однако с точки зрения эффективности, особенно для водосборов, разбитых на большое число ячеек, не является оптимальным вследствие больших дополнительных затрат времени на коммуникации между процессорами. В случае слабосвязанной декомпозиции водосбор предварительно представляется в виде независимых групп ячеек — подводосборов, соединенных речной сетью. Количество стока каждого из них зависит от стока соседних подводосборов вверх по склону или течению реки. Такой подход позволяет задавать сбалансированную нагрузку на процессоры и уменьшить время коммуникации между ними.

Рассмотрим метод слабосвязанной декомпозиции, предложенный в [8], применительно к распределенной модели речного стока, а именно приведение дерева водосбора к бинарному (двоичному) дереву, где каждый узел является совокупностью ячеек водосбора, сток которых зависит только от ячеек в этом узле, т.е. узел дерева является подводосбором. В таком подводосборе имеются две ячейки, соединенные с подобными ячейками подводосборов вниз и вверх по направлению дерева стока. Алгоритм реализован для модели стока с распределенными параметрами ТОРКАРІ-ИПММС, которая является программной реализацией уравнений модели ТОРКАРІ [3, 4]. Код модели написан на языках Python и С с использованием библиотеки MPICH2 на основе интерфейса MPI (Message Passing Interface) [9]. Модель ТОРКАРІ-ИПММС в непараллельном варианте ранее применялась для расчетов стока с водосборов бассейнов рек Тиса и Припять [4, 5].

**Распределенная модель стока ТОРКАРІ** (TOPographic Kinematic Aproximation and Integration) является моделью формирования стока с речных водосборов, которая применялась для расчетов речного стока различных водосборов Европы, Азии и Африки [10, 11]. Эта модель основана на уравнениях ТОРКАРІ, но в программной реализации используются оригинальные вычислительные алгоритмы. Модель включает модули, описывающие процессы почвенного стока, стока воды по поверхности склонов водосбора и движения воды по руслам рек и природным водостокам. Для описания этих гидрологических процессов введены следующие допущения [3]:

1. Осадки, в границах отдельной ячейки водосбора, равномерны на расчетном шаге времени.
2. Все осадки просачиваются в грунт до достижения состояния насыщения.
3. Наклон зеркала воды в грунтах водосбора равен наклону поверхности.

4. Гидравлическая проводимость верхнего слоя грунта постоянна по толщине слоя.

5. Фазой инфильтрации в почву пренебрегаем как быстротекущей, полагая, что вода насыщает грунт без задержки во времени.

6. Толщина слоя воды в произвольный момент равномерна в горизонтальном направлении ячейки водосбора.

7. Ячейки водосбора разделяются на ячейки, в которых происходит только грунтовый и склоновый сток, и ячейки, в которых присутствует русло реки, и происходит русловой сток.

С учетом перечисленных допущений в качестве уравнений движения воды по поверхности водосбора используется упрощение одномерной системы уравнений Сен-Венана, известное как уравнение «кинематической волны» [12]. Для подповерхностного стока уравнения приближения кинематической волны основаны на упрощениях уравнений Буссинеска для грунтового стока [13], вывод которых приведен в [3].

Рассмотрим основные уравнения, использованные в модели ТОРКАРІ-ИПММС. Система уравнений кинематической волны для подповерхностного стока имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial t} = p - \frac{\partial q_s}{\partial x},$$

$$q_s = \frac{L k_s \tan(\beta)}{(\vartheta_s - \vartheta_r)^{\alpha_s} L^{\alpha_s}} \eta_s^{\alpha_s} = C_s \eta_s^{\alpha_s}, \quad (1)$$

где  $q_s$  — горизонтальный поток в почве (расход на единицу ширины, м<sup>2</sup>/с);  $p$  — интенсивность осадков, м/с;  $\eta_s$  — содержание воды в слое грунта в терминах эффективной толщины слоя, м;  $L$  — глубина слоя грунта, в котором происходит горизонтальный сток, м;  $k_s$  — коэффициент гидравлический проводимости грунта в состоянии насыщения, м/с;  $\beta$  — угол наклона поверхности ячейки;  $\vartheta_r$  — полевая влагоемкость;  $\vartheta_s$  — полная влагоемкость (влажность насыщенной почвы);  $\alpha_s$  — гидравлический параметр, значение которого получено в ходе экспериментальных исследований [14];  $C_s$  — удельная гидравлическая проводимость ячейки грунта; индекс  $s$  означает, что уравнения записаны для подповерхностного стока.

Интегрируя первое уравнение системы (1) по  $x$  в пределах квадратной ячейки, выразив  $q_s$  на вытоке из ячейки через  $\eta_s$ , и учитывая предположение, что вток в ячейку формируется суммой подповерхностного и поверхностного стоков из вышележащих ячеек [3], получаем следующее воднобалансовое уравнение:

$$\frac{dV_s}{dt} = px^2 + Q_s^u + Q_f^u - \frac{C_s x}{x^{2\alpha_s}} V_s^{\alpha_s}, \quad (2)$$

где  $V_s$  — объем воды в грунте ячейки (произведение  $\eta_s$  на площадь ячейки),  $\text{м}^3$ ;  $Q_f^u$  — поверхностный сток воды в ячейку,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_s^u$  — подповерхностный сток в ячейку,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; значения  $Q$  получены при решении уравнений модели для ячеек, лежащих вверх по склону; индексом  $u$  обозначены переменные, описывающие вток в ячейку.

Для поверхностного стока систему уравнений кинематической волны запишем аналогично системе (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_f}{\partial t} &= e_f - \frac{\partial q_f}{\partial x}, \\ q_f &= \frac{1}{n} (\tan(\beta))^{\frac{1}{2}} h_f^{\frac{5}{3}} = C_f h_f^\alpha, \end{aligned} \quad (3)$$

где индексом  $f$  обозначены переменные, описывающие поверхностный сток;  $h_f$  — глубина слоя поверхностного стока,  $\text{м}$ ;  $q_f$  — расход воды поверхностного стока на единицу ширины ячейки водосбора,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $e_f$  — величина избыточного насыщения воды из грунта (saturation excess), полученная решением уравнения (2) с помощью соотношений, приведенных в [3],  $\text{м}/\text{с}$ ;  $n$  — коэффициент трения на поверхности ячейки водосбора (коэффициент Маннинга);  $\alpha = 5/3$  — показатель степени в формуле Маннинга [12].

После интегрирования первого уравнения системы (3) по  $x$  в пределах квадратной ячейки и замены значения  $q_f$  на вытоке из ячейки на  $h_f$  согласно второму уравнению системы (3) с учетом предположения о том, что поверхностный вток в ячейку отсутствует, записав содержание воды в терминах объема (произведения  $\eta$  на площадь ячейки), систему уравнений (3) преобразуем к уравнению для объема воды на поверхности ячейки  $V_f$ :

$$\frac{dV_f}{dt} = e_f x^2 - \frac{C_f x}{x^{2\alpha}} V_f^\alpha, \quad (4)$$

где  $C_f = \tan(\beta)^{1/2} / n$  — коэффициент, полученный с использованием формулы Маннинга [12], формально эквивалентный коэффициенту  $C_s$  для почвенного стока.

Для определения ячейки водосбора, содержащей отрезок русла реки, предлагается следующее. С учетом гидрологических и геоморфологических особенностей водосбора задается пороговое значение площади, и, если сумма площадей всех элементов, находящихся выше по склону от данной ячейки, больше заданного значения, то считается, что ячейка содержит отрезок русла реки [15]. Как указано в [3], для большого числа

водосборов пороговое значение не превышает  $25 \text{ км}^2$ . Система уравнений кинематической волны для руслового потока имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_c}{\partial t} &= r_c - \frac{\partial q_c}{\partial x}, \\ q_c &= \frac{1}{n} s_0^{\frac{1}{2}} h_c^{\frac{5}{3}} = C_c h_c^\alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Выполнив интегрирование и подстановки, аналогичные проведенным для (1) и (3), с использованием параметра ширины русловой ячейки  $b$  системе (5) сводим к уравнению

$$\frac{dV_c}{dt} = (r_s + r_f)x^2 + q_c^u x - \frac{C_c b}{(xb)^{\alpha_s}} V_c^{\alpha_c}, \quad (6)$$

где  $h_c$  и  $q_c$  — глубина и скорость потока воды в русле, м и  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r_c$  — боковой приток в русло, формируемый в виде суммы подповерхностного стока  $r_s$  и склонового стока  $r_f$ ,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $s_0$  — уклон русла;  $n$  — коэффициент трения русла (коэффициент Маннинга);  $C_c = s_0^{1/2} / n$  — параметр, получаемый из формулы Маннинга [12];  $V_c$  — объем воды в русловой ячейке,  $\text{м}^3$ .

Воднобалансовые уравнения (2), (4), (6) имеют одинаковую форму и являются обыкновенными дифференциальными уравнениями вида  $dy/(dt) = a - by^c$ . В качестве численного метода решения такой системы обыкновенных дифференциальных уравнений используется метод Рунге—Кутты—Фехльберга с адаптивным шагом [16].

**Декомпозиция водосбора** на независимые группы ячеек осуществляется так же, как и определение элементов с отрезками русел рек, — задается пороговое значение площади и строится аналог речной сети. Полученная сеть разбивается на бесприточные секции и выделяются группы ячеек водосбора, сток которых происходит в соответствующую секцию сети. Это достигается комбинацией двух известных алгоритмов обхода дерева: *post-order and pre-order tree traversals* [17]. Следует заметить, что в качестве порогового значения площади необязательно использовать то же значение, что и в случае определения элементов-русел.

Построенную речную сеть преобразуем в бинарное дерево, где каждый узел является подводосбором, включающим бесприточную секцию речной сети и, соответственно, ячейки водосбора, сток которых происходит в эту секцию (рис. 2.) Каждому подводосбору присваиваем уникальный номер. В случае, когда в верхний по течению элемент речной секции впадает больше двух притоков, в бинарное дерево вводим мнимый узел, который отвечает только за передачу данных о стоке и для которого не решаются уравнения модели.

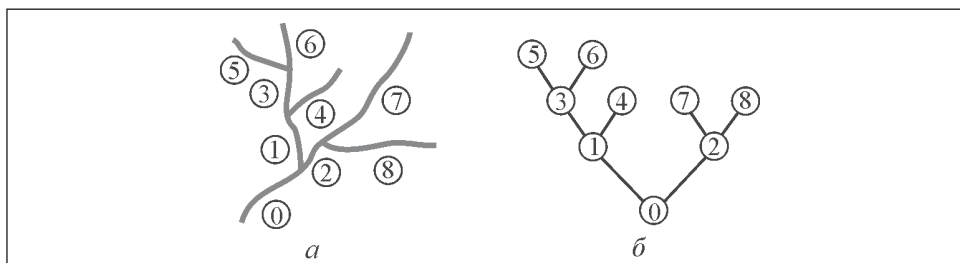


Рис. 2. Схематическое представление речной сети (а) и бинарного дерева (б) подводосборов

Для равномерной нагрузки вычислительных узлов необходимо построение сбалансированного дерева, в котором для каждого узла число узлов в левом и правом поддереве различаются не более чем на единицу, и все узлы-подводосборы имеют одинаковую площадь (равное число ячеек). Однако, построение такого полностью сбалансированного дерева для природного водосбора является трудновыполнимой задачей в силу топографических и геоморфологических особенностей, влияющих на его форму и структуру речной сети.

Для вытянутых нешироких водосборов или водосборов со сложным неравномерным рельефом в результате декомпозиции будет получено несбалансированное дерево, а для водосборов, имеющих приблизительно одинаковую ширину, длину и V-образный рельеф, возможно построение близкого к сбалансированному дереву. Таким образом, выбор оптимального значения пороговой площади для декомпозиции водосбора зависит от его формы и рельефа. В данном случае это значение определялось в результате сравнения увеличения скорости вычисления модели и выбиралось то значение, для которого увеличение скорости вычисления было наибольшим.

**Параллельный алгоритм.** Предложенную реализацию алгоритма с использованием стандарта MPI можно отнести к классу SPMD задач (Single Program Multiply Data). В качестве данных использованы массивы параметров модели для подводосборов и граничные метеорологические условия (осадки, температура), а программой является вычислительный код модели. Расчеты между ядрами процессоров вычислительной системы распределяются согласно классическому подходу в параллельном программировании с использованием иерархической схемы мастер/работник (master/slave) [9].

«Мастер» — это процедура, обеспечивающая инициализацию MPI среды, распределение расчетных задач между процессорами, получение результатов вычислений, а также решение всех задач ввода-вывода. Для



этой процедуры в предлагаемом алгоритме отводится отдельное физическое ядро вычислительной системы. «Работник» — это расчетная процедура, оперирующая модельными данными подводосбора, необходимыми граничными условиями для текущего шага времени и решающая уравнения модели для каждой ячейки подводосбора. Для этой процедуры выделяются все остальные физические ядра вычислительной системы.

На этапе инициализации создаются следующие структуры данных:

- Массив `model_data`, представляющий совокупность параметров модели для каждой ячейки водосбора.
- Хэш-таблица `sw_dict`, из которой по заданному коду подводосбора можно получить массив с его текущими данными и код подводосбора в них по склону.
- Очередь `ready_queue`, предназначенная для хранения кодов подводосборов, отправляемых на вычисление. Изначально очередь заполняется подводосборами, не имеющими приточности из других водосборов. Список `uncomputed_list`, содержащий все коды, из которого по мере вычислений удаляются коды рассчитанных подводосборов.

В терминах псевдокода [18] алгоритм может быть записан в следующем виде:

```
for each timestep in period of modeling:
[Master node]
initialize model_data; // array with model parameters for each cell
MPI_Init();
create ready_queue; // queue of ready for calculation subwatersheds;
MPI_Send(initial allocation subwatersheds to free Slave nodes);

while (exist codes in uncomputed_list) do
    subwatershed_data,code = MPI_Recv(calculated subwatershed);
    update model_data with subwatershed_data;
    remove code from uncomputed_list;
    from sw_dict find outflow_subwatershed for subwatershed;
    update outflow_subwatershed if there is one;
    update ready_queue;
    get next available for calculation subwatershed from ready_queue;
    MPI_Send(next subwatershed to free Slave node);

MPI_Recv(calculated root subwatershed);
MPI_Recv (send message to all slaves to shutdown);
perform I/O tasks;
[Slave node]
while (not informed to shutdown):
```



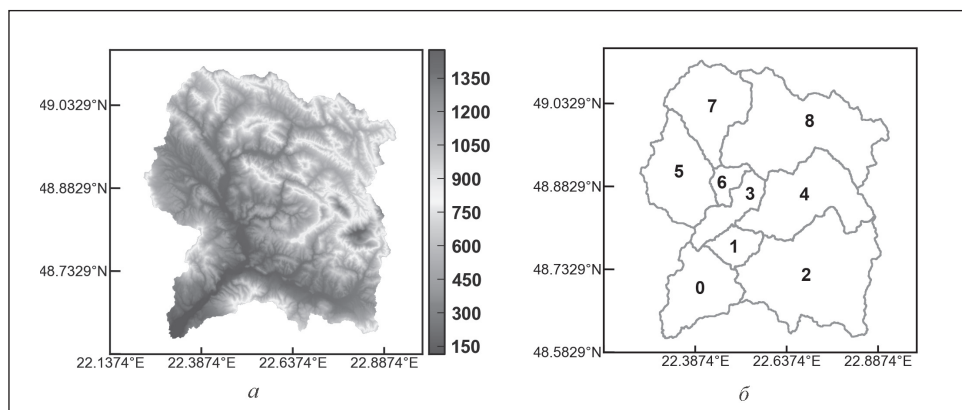


Рис. 3. Водосбор реки Уж: *a* — карта высот; *б* — декомпозиция на подводосборы при пороговом значении площади  $197 \text{ км}^2$

```
MPI_Recv(subwatershed_data_array)
perform calculations of model equations for current subwatershed
MPI_Send(subwatershed data array)
```

В данном алгоритме: *subwatershed* — текущий подводосбор; *master node* — процедура «Мастер»; *computational node* — вычислительная процедура «Работник»; *MPI\_Send*, *MPI\_Recv* — соответствующие процедуры стандарта MPI. Таким образом, описанный алгоритм позволяет масштабировать вычисление модели на любое число расчетных узлов, обеспечивая увеличение скорости расчета.

**Тестирование алгоритма** выполнено при расчете дождевых паводков водосбора реки Уж с замыкающим створом в г. Ужгород. Модель водосбора построена на основе цифровой карты высот SRTM [19] с шагом 90 м. Поскольку для построения дерева стока необходима карта высот в метрической проекции, исходная карта была спроецирована в WGS UTM с соответствующей украинскому Закарпатыю зоной 34N. Полученная карта имеет пространственный шаг 76 м. С помощью ГИС-препроцессора модели [4] построен водосбор реки Уж (рис. 3, *a*), площадь которого составляет  $1970 \text{ км}^2$ .

При указанном размере ячейки число элементов водосбора равно 335476. Водосбор имеет грушевидную форму и приблизительно одинаковую ширину и длину ( $55 \times 56 \text{ км}$ ). Рельеф водосбора сложный — включает верхнюю горную часть и нижнюю равнинную. Для декомпозиции и сравнения длительности расчета выбраны четыре пороговых значения площади, 0,1, 0,01, 0,001 и 0,0005, в относительных единицах от общей площади водосбора, которые соответственно равны 197, 19,7, 1,97, 0,985 ( $\text{км}^2$ ) (рис. 3, *б*).

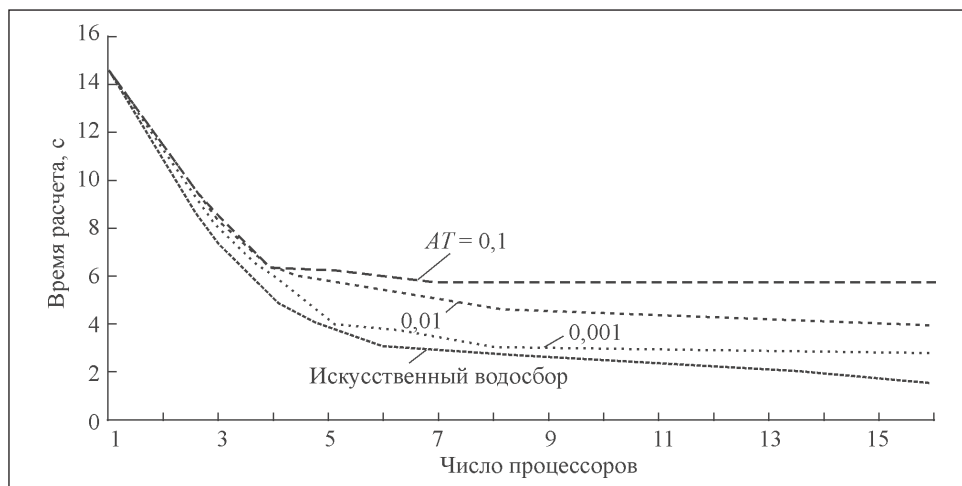


Рис. 4. Графики зависимости времени расчета одного шага модели от числа процессоров:  $AT$  — пороговое значение площади

Параметры полученных деревьев приведены в таблице, из которой видно, что декомпозиция водосбора при любых значениях пороговой площади не приводит к сбалансированному дереву. Поэтому для более детальной оценки эффективности параллельного алгоритма было построено сбалансированное бинарное дерево глубиной, равной восьми узлам, представляющее искусственный водосбор, состоящий из такого же числа ячеек, как водосбор реки Уж. Число узлов-подводосборов в таком дереве равно 511 и каждый узел включает одинаковое число ячеек, равное 656, кроме замыкающего подводосбора, число ячеек которого равно 916. Расчет на таком водосборе позволит оценить предельное ускорение алгоритма.

Для запуска параллельного кода модели использован сервис облачных вычислений Amazon EC2 [20]. Создан кластер под управлением ОС Ubuntu

Пороговое значение площади, км <sup>2</sup>	Число подводосборов	Глубина дерева подводосборов, узлы	Продолжительность тестового расчета на процессорах, с		
			трех	восьми	шестнадцати
197	9	4	8,5	5,75	5,7
19,7	51	12	8,32	5,0	4,0
1,97	588	66	8,0	3,50	2,73
0,985	1080	97	8,0	3,45	2,72
Искусственный водосбор	511	8	7,4	2,75	1,59

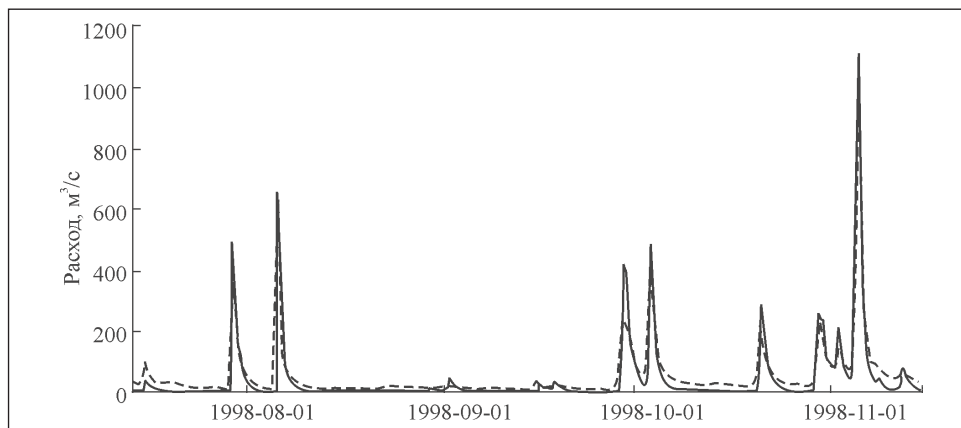


Рис. 5. Результаты моделирования стока водосбора с замыкающим створом в гидрологическом посту г. Ужгород с июля по ноябрь 1998 г.: — рассчитанный расход; - - - измеренный расход

tu 12.10, состоящий из 16 узлов на основе процессора Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670 v2 @ 2.50GHz. Время расчета при физическом шаге модели 1 ч для непараллельной версии кода модели (используется один вычислительный узел) составляет в среднем 14,4 с. Продолжительность расчета с использованием кластера для различных вариантов декомпозиции приведена в таблице и на рис. 4.

Результаты тестирования показали, что использование параллельного алгоритма позволило существенно уменьшить время расчета: максимальное ускорение расчета для 16 вычислительных узлов составило 5,5 раза и продолжительность расчета одного шага сократилась от 14,4 до 2,7 с. В тоже время, ускорение расчета на искусственном водосборе составило 9,1 с, продолжительность расчета одного шага уменьшилась до 1,59 с. Декомпозиция на большее число подводосборов, при пороговом значении площади меньше 0,001, для рассмотренного числа ячеек не приводит к существенному уменьшению времени расчета. На рис. 4 кривая для  $AT = 0,0005$  не приведена, так как она практически сливается с кривой для  $AT = 0,001$ .

Тестирование модели, проведенное после калибровки ее параметров по двум высоким летним паводкам 1998 г., показало хорошее согласование рассчитанных и измеренных расходов воды в период экстремального ноябрьского паводка на реке Уж (рис. 5).

Результат проведенного исследования на облачном кластере Amazon свидетельствует об эффективности предложенного алгоритма сбалансированной декомпозиции водосборов для параллельных расчетов стока с водосборов средних размеров. Полученный результат позволяет перейти к

следующему этапу исследований для больших водосборов на более мощных вычислительных кластерах Украинского национального грида (УНГ) [21] после согласованной установки на них необходимого программного обеспечения. Использование ресурсов УНГ необходимо и при переходе от тестовых задач к задачам оперативного прогнозирования паводков, для которых необходимо использовать каскад моделей в грид-технологиях. При каскадном моделировании результаты численного прогноза осадков на 3—5 суток, рассчитанные на одном сервере УНГ, по мере расчета будут передаваться на другой грид-сервер, проводящий оперативное прогнозирование стока согласно представленной параллельной модели для обеспечения необходимой оперативности в прогнозах паводков на больших водосборах.

### Выводы

Предложенный алгоритм параллельного решения уравнений распределенной модели речного стока с водосборов позволяет достигнуть сбалансированной нагрузки многопроцессорной системы и значительно сократить время расчета. На примере водосбора реки Уж, разбитого на 335 000 расчетных ячеек для различных вариантов декомпозиции водосбора, проанализировано ускорение расчета на различном числе процессоров (от 1 до 16). В результате исследования найден вариант декомпозиции водосбора, для которого на используемом кластере удалось достигнуть ускорения расчета в 5,5 раз.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности дальнейшего применения разработанной технологии для создания систем прогнозистического расчета паводков на больших реках и моделирования многолетнего речного стока с больших водосборов, что особенно важно при оценке влияния изменений климата на водный режим.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh V.P. Computer Models of Watershed Hydrology. — Water Resources Publications, 1995. — 1130 p.
2. Beven K. et al. Topmodel // Computer Models of Watershed Hydrology. — 1995. — P. 627—668
3. Liu Z. L., Todini E. The TOPKAPI model // Hydrology and Earth System Sciences. — 2002. — No 6. — P. 859—881
4. Бойко О.В., Железняк М.Й. Оцінка ефективності протипаводкових заходів на малих річкових водозборах Закарпаття на основі розрахунків розподіленої моделі «опадистік» // Математичні машини і системи. — 2011. — № 4. — С. 149—160.
5. Бойко О.В. Технологія обробки просторових даних засобами ГІС для використання в розподілених гідрологічних моделях // Там же. — 2012. — № 1. — С. 36 — 44.
6. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. — СПб. : БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.

7. Paglieri L. et al. Parallel computation for shallow water flow: a domain decomposition approach // *Parallel Computing*. — 1997. — No 23. — P. 1261—1277.
8. Hao Wang et al. A common parallel computing framework for modeling hydrological processes of riverbasins // *Ibid.* — 2011. — No 37. — P. 302—315.
9. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI, 2nd ed.: Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface. — Cambridge, MA, USA: MIT Press Scientific And Engineering Computation Series. — 1999. — 350 p.
10. Vischel T. et al. Comparison of soil moisture fields estimated by catchment modelling and remote sensing: a case study in South Africa // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2008. — No 12. — P. 751—767.
11. Liu Z., Martina M.L.V., Todini E. Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment // *Ibid.* — 2005. — No 9. — P. 347—364.
12. Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 256 с.
13. Beven K. Kinematic subsurface stormflow // *Water Resources Research*. — 1981. — No 17. — P. 1419—1424.
14. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic properties of porous media // *Hydrologic Papers*. — 1978. — No 3. — 27 p.
15. Vieux B.E. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS // *Series: Water Science and Technology Library*. — 2004. — Vol. 48, 2nd ed. — 289 p.
16. Fehlberg E. Low-order classical Runge-Kutta formulas with step size control and their application to some heat transfer problems // *National Aeronautics and Space Administration*. 1969. — Technical Report 315. — 27 p.
17. Drozdek A. Data Structures and Algorithms in C++. — Brook and Cole. Pacific Grove, CA, 2001. — 511 p.
18. Макконелл Дж. Основы современных алгоритмов. — М.: «Техносфера», 2004. — С. 10—11.
19. <http://srtm.csi.cgiar.org>
20. <http://aws.amazon.com/ru/ec2/>
21. Martynov E., Zinovjev G., Svistunov S. Academic segment of Ukrainian Grid infrastructure // *System Research and Information Technologies*. — 2009. — № 3. — P. 31—42.

*A.V. Boyko, M.I. Zheleznyak*

TECHNOLOGY OF PARALLEL PROCESSING  
OF SPATIALLY DISTRIBUTED DATA  
FOR RUNOFF MODEL OF RIVER WATERSHED

The growing computer powers and development of information technologies permit using the multi-processor systems for computation of a broad class of hydrologic problems. A method was offered for parallel solution of equations of distributed river runoff model based on the theory of binary trees. The watershed was presented in a form of a binary tree which nodes are independent sub-watersheds, that allows performing calculations computations using multiprocessor systems. The efficiency of the parallel model has been analyzed by computation of flood runoff of the Uzh river watershed.

*Keywords: flood modeling, distributed runoff models, parallel computation, information technology.*

REFERENCES

1. *Singh V.P.* Computer Models of Watershed Hydrology. — Water Resources Publications, 1995. — 1130 p.
2. *Beven K.* Topmodel. // Computer Models of Watershed Hydrology. — Water Resources Publications, 1995. — P. 627—668.
3. *Liu Z., Todini E.* The TOPKAPI model // Hydrology and Earth System Sciences. — 2002. — No 6. — P. 859—881.
4. *Boyko O., Zheleznyak M.* Assessment of flood mitigation measurements for Transcarpathian small watersheds based on distributed rainfall-runoff model // Mathematical Machines and Systems. — 2011. — No 4. — P. 149—160 (in Ukrainian).
5. *Boyko O.* Technology of GIS processing of spatially distributed data for runoff model of river watershed. — Ibid. — 2012. — No 1. — P. 36—44 (in Ukrainian).
6. *Voevodin V.V., Voevodin V.I.* Parallel Computing. — St.-Petersburg: BHV Petersburg, 2002. — 608 p. (in Russian).
7. *Paglieri L. et al.* Parallel computation for shallow water flow: a domain decomposition approach // Parallel Computing. — 1997. — No 23. — P. 1261—1277.
8. *Hao Wang et al.* A common parallel computing framework for modeling hydrological processes of riverbasins // Ibid. — 2011. — No 37. — P. 302—315.
9. *Gropp W., Lusk E., Skjellum A.* Using MPI: portable parallel programming with the message-passing interface. — Cambridge, MA, USA: MIT Press Scientific and Engineering Computation Series. — 1999. — 350 p.
10. *Vischel T. et al.* Comparison of soil moisture fields estimated by catchment modelling and remote sensing: a case study in South Africa // Hydrology and Earth System Sciences. — 2008. — No 12. — P. 751—767.
11. *Liu Z., Martina M.L.V., Todini E.* Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment. — Ibid. — 2005. — No 9. — P. 347—364.
12. *Cunge J.A., Holly F.M., Verwey A.* Practical Aspects of Computational River Hydraulics. — London: Pitman, 1980. — 256 p. (in Russian).
13. *Beven K.* Kinematic subsurface stormflow // Water Resources Research. — 1981. — No 17. — P. 1419—1424.
14. *Brooks R.H., Corey A.T.* Hydraulic properties of porous media // Hydrologic Papers (Colorado State University, Ft. Collins). — 1964. — No 3. — 27 p.
15. *Vieux B.E.* Distributed Hydrologic Modeling Using GIS // Series: Water Science and Technology Library. — 2004. — Vol. 48, 2nd ed. — 289 p.
16. *Fehlberg E.* Low-order classical Runge-Kutta formulas with stepsize control and their application to some heat transfer problems // National Aeronautics and Space Administration. — 1969. — Technical Report 315. — 27 p.
17. *Drozdek A.* Data Structures and algorithms in C++. — Brook and Cole. Pacific Grove, CA, 2001. — 511 p.
18. *McConnell J. J.* Analysis of Algorithms. — Jones and Bartlett Learning, 2008.
19. <http://srtm.csi.cgiar.org>
20. <http://aws.amazon.com/ru/ec2/>
21. *Martynov E., Zinovjev G., Svistunov S.* Academic segment of Ukrainian Grid infrastructure // System Research and Information Technologies. — 2009. — No 3. — P. 31—42.

Поступила 08.09.14;  
после доработки 03.11.14

*БОЙКО Алексей Владимирович, аспирант, мл. науч. сотр. отдела математического моделирования окружающей среды Ин-та проблем математических машин и систем НАН Украины. В 2004 г. окончил Ин-т прикладного системного анализа Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — математическое моделирование гидрологических процессов, геоинформационные системы, экстремальные наводки, разработка компьютерных систем поддержки принятия решений по защите окружающей природной среды и населения при природных и техногенных катастрофических явлениях, распространения радионуклидов в окружающей среде.*

*ЖЕЛЕЗНЯК Марк Иосифович, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом математического моделирования окружающей среды Ин-та проблем математических машин и систем НАН Украины, профессор Ин-та радиологии окружающей среды Университета Фукусима, Япония. Лауреат государственной премии Украины в области науки и техники. В 1973 г. окончил Одесский гидрологический ин-т. Область научных исследований — разработка компьютерных систем поддержки принятия решений по защите окружающей природной среды и населения при природных и техногенных катастрофических явлениях, включая аварии на АЭС, цунами, штормовые нагоны, экстремальные наводки; математическое моделирование динамики речных и прибрежных морских систем, распространения радионуклидов в окружающей среде.*



