

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

ВОСЬМАЯ СИБИРСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ  
И ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫМ  
ВЫЧИСЛЕНИЯМ

*Томск, 28–30 октября 2015 года*



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
2015

УДК 519.6

ББК 22.19

В 51

**В 51** **Восьмая** Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. – 164 с.

ISBN 978-5-7511-2389-5

Включены материалы Восьмой Сибирской конференции по параллельным и высокопроизводительным вычислениям, проходившей 28–30 октября 2015 г. в Томском государственном университете при поддержке Министерства образования и науки РФ, Суперкомпьютерного консорциума России, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-07-20872) и ЗАО «Intel Software».

Рассмотрены актуальные проблемы организации параллельных вычислений на многопроцессорных системах, современное состояние и перспективы развития методов параллельных вычислений.

Для студентов, аспирантов, преподавателей, научных работников, желающих изучить и практически использовать в научной работе высокопроизводительные вычислительные ресурсы.

**УДК 519.6**

**ББК 22.19**

ISBN 978–5–7511–2389–5

© Томский государственный университет, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Мизяк В.Г. Параллельный программный комплекс модели атмосферы для прогноза погоды и моделирования климата .....	5
Шумилов Б.М., Сулайманов З.М. О расщеплении сплайн-вейвлет алгоритмов .....	12
Чуруксаева В.В., Старченко А.В. Численный метод для расчета турбулентного течения со свободной поверхностью .....	20
Ботыгин И.А., Волков Ю.В., Тартаковский В.А. Итеративный параллельный алгоритм формирования климатических кластеров для классификации температурных полей .	26
Купчишин А.Б. Эффективная реализация метода когерентного суммирования и метода шагающих кубов для современных универсальных процессоров.....	31
Колесов А.Е. Численное моделирование задач пороупругости на высокопроизводительных вычислительных системах.....	39
Катаев М.Ю., Лукьянов А.К., Крупский А.С. Параллельные технологии в задачах подготовки многомерных данных к использованию в приложениях.....	48
Катаев М.Ю., Лукьянов А.К., Крупский А.С. Подход к решению задачи кластеризации спутниковых изображений на кластере.....	54
Зюзьков В.М. Новые вероятностные тесты на простоту .....	60
Киреев С.Е., Перепелкин В.А., Ткачёва А.А. Реализация метода IADE-RB-CG в системе фрагментированного программирования LuNA .....	66
Чернокутов М.А. Методы высокопроизводительной обработки графов.....	73
Терентьева М.В., Старченко А.В. Численное решение задачи тепло- и влагообмена в почве.....	80
Эшаров Э.А. Новые подходы к определению середины линии автомобильной дороги при обработке данных лазерного сканирования .....	87
Потоцкая А.А., Михайлов М.Д. Исследование задачи о разрушении плотины .....	95
Михневич В.Л., Берцун В.Н. Об аддитивной разностной схеме для расчета на кластере теплового состояния многослойного ортотропного цилиндра.....	100
Уколов Р.Ю., Меркулова Н.Н. Исследование модели морфогенеза растений с применением разностных схем .....	109
Федорова О.П. Амшарюк Е.И. К вопросу о выборе словаря признаков при классификации видеозаписей .....	115

Ботыгин И.А. Крутиков В.А. Разработка и реализация методов и алгоритмов построения распределенной инфраструктуры информационно-вычислительных ресурсов для решения крупномасштабных научных задач на основе концепции персонального грида .....	121
Нагиев А.Е. Ботыгин И.А. Программный эксперимент по балансировке нагрузки в распределенной вычислительной системе .....	127
Власенко А.Ю. Гибридный подход к автоматизированной отладке параллельных программ .....	132
Кривошеин С.Г., Окулов Н.Н. Архитектура системы удаленного доступа к вычислительным ресурсам .....	139
Перышкова Е.Н., Мамоilenко С.Н., Ефимов А.В. Инструментарий решения масштабируемых задач на распределенных вычислительных системах .....	143
Ерин С.И., Бородинa И.А. Применение методов фильтрации к данным спутниковых измерений влажности почвы .....	151

## Литература

1. *Hendrickson B., Berry J.W.* Graph analysis with high-performance computing // Computing in Science and Engineering. 2008. Vol. 10, N. 2. P. 14–19.
2. *Lumsdaine A., Gregor D., Hendrickson B., Berry J.W.* Challenges in Parallel Graph Processing // Parallel Processing Letters 17. 2007. P. 5–20.
3. *Beamer S., Asanovic K., Patterson D.* Direction-optimizing breadth-first search // Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Salt Lake City, Utah, USA, 2012. P. 12–22.
4. *Черноскутов М.А., Ермаков Д.Г.* Балансировка нагрузки в ГПУ-реализации поиска в ширину на графе // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 54–62.
5. *Murphy R., Wheeler K., Barrett B. et al.* Introducing the Graph 500 // Cray User's Group (CUG), May 5, 2010. P. 1–3.

## Численное решение задачи тепло- и влагообмена в почве

DOI 10.17223/978-5-7511-2389-5/12

**М.В. Терентьева, А.В. Старченко**

Томский государственный университет, Томск  
*mariya-terenteva@mail.ru, starch@math.tsu.ru*

*Произведена модификация имеющейся одномерной микромасштабной метеорологической модели высокого разрешения [1] путем включения схемы параметризации ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere), разработанной J. Noilhan и S. Planton [2]. Эта схема описывает обмен тепла и воды между нижним уровнем атмосферы, растительностью и почвой. Схема включает в себя пять прогностических уравнений для температуры почвы на глубине, содержания воды в почве на глубине, температуры на поверхности почвы/растительности,  $T_s$ , содержания воды на поверхности почвы и перехвата воды, задержавшейся на поверхности растительности. Представлено сравнение численных решений задачи тепло- и влагообмена в почве.*

Ключевые слова: математическое моделирование, атмосферный пограничный слой, тепло- и влагообмен в почве.

Изучение атмосферных процессов, происходящих в планетарном пограничном слое, в настоящее время имеет большое значение для решения таких прикладных задач, как локальный прогноз погоды, изучение формирования атмосферных циркуляций, образования ту-

---

\* Работа выполнена по Государственному заданию Министерства образования и науки РФ, №5.628.2014/К.

манов и облачности и др. Одним из основных инструментов в исследовании атмосферы является математическое моделирование.

Была разработана метеорологическая модель высокого разрешения для прогноза и исследования погодных явлений [1]. В данной модели применялись следующие допущения:

- предполагалось, что плотность воздуха зависит от базовых значений давления и температуры атмосферного пограничного слоя, вариации плотности в зависимости от изменения температуры учитываются только при моделировании турбулентности;

- процессы молекулярной диффузии незначительны по сравнению с турбулентным обменом;

- предполагалось, что метеорологические параметры изменяются лишь по времени и в зависимости от вертикальной координаты.

Модель использует микрофизику теплого дождя, предложенную Кесслером [3], то есть предполагается, что в атмосфере влага может присутствовать только в виде водяного пара, облачной и дождевой воды. Учитываются процессы аккреции (захват облачной влаги дождевой), автоконверсии (слипание облачных капель с образованием дождевых), конденсации и испарения. Построенная таким образом система уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями интегрировалась с помощью метода конечных объемов и неявных схем. Получившиеся после аппроксимации системы трехточечных уравнений решались методом прогонки.

Для моделирования радиационного переноса тепла как при ясном небе, так и при наличии облачности используется подход, основанный на делении всего спектра излучения на коротковолновую и длинноволновую составляющие [4]. Поток солнечного излучения трансформируется в толще земной атмосферы посредством атмосферной влаги. Поток длинноволнового излучения земли претерпевает изменения, рассеиваясь атмосферой, но и усиливается излучением самой атмосферы.

Для достоверного моделирования состояния атмосферы важную роль играют также процессы, протекающие на подстилающей поверхности и в деятельном слое суши, оказывающие существенное влияние на термический режим и влагообмен в нижней тропосфере. Деятельный слой почвы играет ключевую роль как резервуар влаги, контролирующей, в частности, испарение.

Поэтому была произведена модификация метеорологической модели путем включения схемы параметризации ISBA (Interaction

Soil Biosphere Atmosphere), разработанной J. Noilhan и S. Planton [2]. Эта схема описывает обмен тепла и воды между нижним уровнем атмосферы, растительностью и почвой. Так как ISBA была разработана для метеорологических моделей, это относительно простая схема, но она охватывает наиболее важные компоненты процессов, происходящих на поверхности земли. Простота схемы достигается за счет калибровки нескольких важных коэффициентов с более сложных моделей и экспериментальных данных.

Схема включает в себя обработку теплосодержания почвы, содержания влаги в почве, воды, перехваченной растительностью, и аэродинамических процессов переноса в приземном слое атмосферы. Схема использует модель восстановления тепла и содержания воды в почве и модель испарения. Другие важные особенности схемы заключаются в представлении гравитационного дренажа, введении теплоемкости почвы/растительности  $C_T$ .

В модели ISBA пять прогностических уравнений для температуры почвы на глубине,  $T_2$ , содержания воды в почве на глубине,  $w_2$ , температуры на поверхности почвы/растительности,  $T_s$ , содержания воды на поверхности почвы,  $w_g$  и перехвата воды, задержавшейся на поверхности,  $W_r$ .

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_T (R_n - H - LE) - \frac{2\pi}{\tau} (T_s - T_2), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (T_s - T_2), \quad (2)$$

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{C_1}{\rho_w d_1} (P_g - E_g) - \frac{C_2}{\tau} (w_g - w_{g_{eq}}),$$

$$0 \leq w_g \leq w_{sat} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2} (P_g - E_g - E_{tr}) - \frac{C_3}{d_2 \tau} \max[0, (w_2 - w_{fc})],$$

$$0 \leq w_2 \leq w_{sat} \quad (4)$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial t} = \text{veg}P - (E_v - E_{tr}) - R_r, \quad 0 \leq W_r \leq W_{max}, \quad (5)$$

где  $\text{veg}$  – доля растительного покрова.

Только один энергетический баланс рассматривается для всей системы поверхность – растительность. Как результат, переходы тепла и массы между поверхностью и атмосферой связаны со средними значениями  $T_s$  и  $w_g$ .

Радиационный баланс на поверхности есть сумма поглощенных частей поступающего солнечного излучения  $R_G$  и атмосферного длинноволнового излучения  $R_A$ :

$$R_n = R_G (1 - \alpha_r) + \epsilon_r (R_A - \sigma T_s^4) = H + LE + G,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $H$  – турбулентный поток тепла,  $LE$  – поток скрытого тепла и  $G$  – поток тепла в почву.

Турбулентные потоки рассчитываются с помощью классических аэродинамических формул. Для потока явного тепла

$$H = \rho_a C_p C_H V_a (T_s - T_a),$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха;  $\rho_a$ ,  $V_a$ , и  $T_a$  обозначают соответственно плотность воздуха, скорость ветра и температуру на самом низком уровне атмосферы и  $C_H$  – коэффициент сопротивления в зависимости от термической устойчивости атмосферного пограничного слоя. Поток испарения воды  $E$  определяется как сумма испарения с поверхности почвы (т.е.  $E_g$ ) и от растительности (т.е.  $E_v$ ):

$$LE = LE_g + LE_v,$$

$$E_g = (1 - \text{veg}) \rho_a C_H V_a [h_u q_{sat}(T_s) - q_a],$$

$$E_v = \text{veg} \rho_a C_H V_a h_u [q_{sat}(T_s) - q_a],$$

где  $L$  – скрытая теплота парообразования,  $q_{sat}(T_s)$  – насыщенная влажность при температуре  $T_s$ ,  $q_a$  – влажность на самом низком уровне атмосферы,  $h_u$  – относительная влажность на поверхности земли,  $h_v$  – коэффициент Хэлстида.

Уравнения (1) – (5) можно представить в общем виде:



$$\frac{\partial U}{\partial t} = F(U, t), \quad (6)$$

с начальным условием  $U(0, x, y) = U_0(x, y)$ ,  $U_0(x, y) = \text{const}$ .

Правую часть уравнения представим в следующем виде:

$$F(U, t) = A(U, t) - B(U, t)U, \quad (7)$$

где  $A(U, t) > 0$ ,  $B(U, t) > 0$  для  $\forall t$ .

Представление (7) обеспечивает неотрицательность расчетных физических параметров.

Задача (1) – (5) вместе с начальными условиями решалась численно конечно-разностным методом. Дискретный аналог дифференциальной задачи (1) – (5) строился с первым порядком аппроксимации по времени – неявный метод Эйлера, со вторым – метод Эйлера–Коши (метод Хьюна). Также, на некотором интервале  $(t, t + \Delta t)$  уравнение (6) решалось приближенно аналитически.

Таким образом, для решения задачи (1) – (5) были получены следующие формулы:

$$U^{k+1} = \frac{U^k + \tau A(U^k, t^k)}{1 - \tau B(U^k, t^k)}, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$U^{k+1} = \frac{\tau A(U^k, t^k) + [1 - \tau B(U^k, t^k)/2]}{1 + \tau B(U^k, t^k)/2}, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

$$U^{k+1} = \frac{A(U^k, t^k)}{B(U^k, t^k)} - \left[ \frac{A(U^k, t^k)}{B(U^k, t^k)} - U^k \right] \cdot \exp(-B(U^k, t^k) \cdot \tau), k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

где (8) – формула для неявного метода Эйлера, (9) – формула для метода Эйлера – Коши (метод Хьюна), (10) – формула для приближенного аналитического решения уравнения (6).

Рассмотрены метеорологические условия в г. Томске (координаты  $56^\circ, 29$  с.ш.,  $84^\circ, 57$  в.д.) на 27 августа и 17 сентября 2012 г. (время мест.).

Полученные результаты расчетов по разработанной модели с использованием различных численных методов не показали существенного преимущества того или иного метода, так как значения прогнозируемых параметров отличались на величину порядка  $10^{-6}$ , не существенную для данной задачи.

На рисунке 1 приведены графики температуры почвы на глубине 2 м –  $T_2$  и температуры в поверхностном слое почвы (на глубине 0,10 м) –  $T_s$  для расчетных дат.

На графиках видно что, в первой половине дня, когда Солнце нагревает воздух в атмосфере, также прогревается и поверхность почвы. Глубокий слой почвы также прогревается посредством нагрева атмосферы и поверхностного слоя почвы, но уже с меньшей интенсивностью.

На рисунке 2 представлены графики суточного изменения таких параметров, как содержание воды в поверхностном слое почвы (на глубине 0,10 м) –  $w_g$  и содержание воды в более глубоком слое (на глубине 2 м) –  $w_2$ .

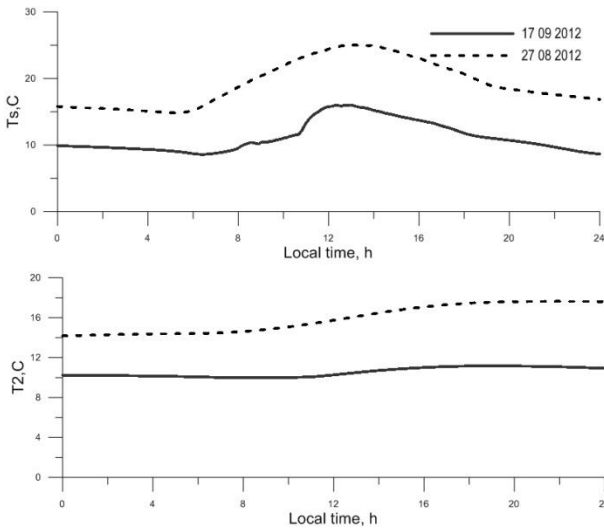


Рис. 1. Рассчитанные значения температуры почвы на глубине,  $T_2$ , температуры в поверхностном слое почвы,  $T_s$ , 27 августа и 17 сентября 2012 г.

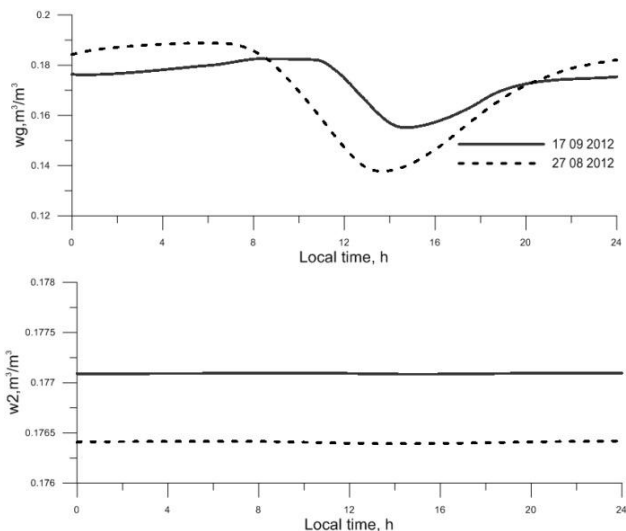


Рис. 2. Содержание воды на поверхности почвы,  $w_g$ , содержание воды в почве на глубине,  $w_2$ , 27 августа и 17 сентября 2012 г.

Анализируя рис. 1 и рис. 2, можно отметить, что в утренние и дневные часы, когда температура поверхности почвы увеличивается, содержание влаги в этом слое уменьшается, и наоборот, когда температура начинает падать, содержание влаги в поверхностном слое увеличивается. Эти результаты соответствуют физике рассматриваемых процессов.

Графики количества воды, задержавшейся на поверхности –  $w_r$ , не приводятся, так как они близки к нулю и не меняются в течение суток. Это объясняется тем, что для рассматриваемых дат осадки не наблюдались.

Таким образом, рассмотрены три метода для численного решения поставленной задачи: неявный метод Эйлера, метод Эйлера – Коши, приближенное аналитическое решение. Отличия в расчетах с использованием данных методов не существенны, и, следовательно, описанные методы наравне друг с другом могут использоваться для численного решения задачи тепло- и влагообмена в почве.

## Литература

1. Terenteva M.V., Sitnikov G.I., Starchenko A.V. Homogeneous boundary layer model for forecasting of atmospheric processes nearby airport // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 92924E (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2075248
2. Noilhan J., Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterization scheme // Global and Planetary Change, 1996, Vol.13. P. 145 – 159.
3. Kessler E. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation. Meteorology Monograph // Bulletin of the American Meteorological Society. 1969. N. 32. P. 84–112.
4. Hurley P. The Air Pollution Model (TAPM) Version 2 // CSIRO Atmospheric Research Technical Paper. №55. 2002.
5. Толстых М.А., Булдовский Г.С. Усовершенствованный вариант глобальной полулагранжевой модели прогноза полей метеоэлементов в версии с постоянным разрешением заблаговременностью до 10 суток и результаты его оперативных испытаний // Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 24–47.

## Новые подходы к определению серединой линии автомобильной дороги при обработке данных лазерного сканирования

DOI 10.17223/978-5-7511-2389-5/13

**Э.А. Эшаров**

Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
Томск  
*elzare78@mail.ru*

*Представлено решение задачи синтеза поверхности автомобильной дороги по материалам лазерного сканирования на основе метода срединных траекторий и параметрической идентификации нелинейных дифференциальных уравнений. Для построения динамических моделей закономерностей поведения отдельных треков используются рекуррентные сплайны.*

Ключевые слова: лазерное сканирование, срединная линия, обработка данных, дифференциальные уравнения, рекуррентные сплайны.

## Введение

Большая часть автомобильных дорог в России находятся в плохом состоянии. Эффективную технологию для проектирования ремонтов дорожного полотна предоставляет наземное лазерное сканирование. Лазерное сканирование – новое направление в 3D измере-