

Е.С. Тятиюшина, А.С. Козелков, А.А. Куркин
ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТА ТИПА
ЧЕЛЯБИНСКОГО В БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА
ПРОГРАММ ЛОГОС

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Представлены результаты моделирования падения метеорита в Балтийское море, последующего распространения волн и их накат на берег. Расчеты проводились в пакете программ ЛОГОС в рамках трехмерных уравнений Навье-Стокса.

Ключевые слова: уравнения Навье-Стокса, течения со свободной поверхностью, цунами, ЛОГОС

В 2013 году в окрестности города Челябинск (Россия) в результате торможения в атмосфере Земли взорвался и разрушился метеорит. Падение метеорита сопровождалось серией атмосферных взрывов, с распространением ударных волн над территорией Челябинской области. На территорию области обрушились мелкие фрагменты метеорита. Это самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю после Тунгусского метеорита в 1908 году. В источниках [1 – 3] приводятся следующие оценки характеристик метеорита: диаметр - 16-19 м/с, скорость - 150-300 м/с, угол входа - 20°. В данной статье представлены результаты моделирования падения метеорита со схожими характеристиками в Балтийское море. Численное моделирование проводится для нескольких вариантов характеристик метеорита с варьированием скорости и диаметра.

Наиболее полной системой уравнений, позволяющей учесть особенности моделирования волн, вызванных падением метеорита является система уравнений Навье-Стокса [4]. При этом можно выполнять сквозное моделирование всех стадий процесса: входжение твердого тела в воду, развитие волновой картины (рис. 1), наката волн на берег. Также возможен естественный учет батиметрии дна водной акватории любой конфигурации.

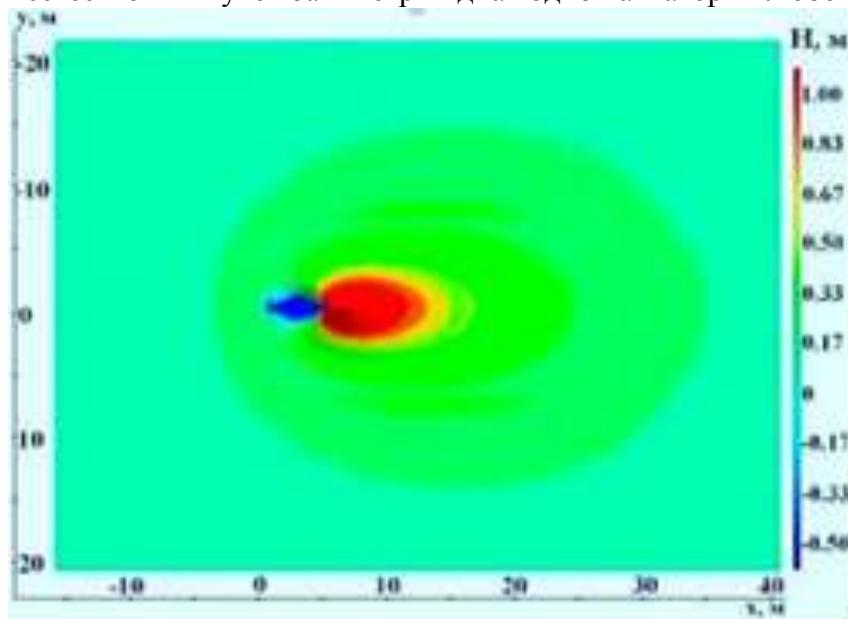


Рис. 1. Начальная стадия возмущения водной поверхности при падении метеорита

Использование данного подхода в настоящее время ограничено, ввиду необходимости использования трехмерной дискретной модели большой размерности, высокими требованиями к устойчивости расчета высокоскоростных соударений тела о водную

поверхность и распространения волн малой амплитуды на огромные расстояния. Однако современный уровень развития вычислительных технологий, которые уже применяются в инженерной практике при проектировании высокотехнологичных технических изделий [5], позволяет перевести моделирование в проблеме цунами на качественно новый уровень.

Для моделирования падения метеорита в Балтийское море (рис. 2), последующего распространения волн и их наката на берег используются уравнения Навье-Стокса совместно с методом Volume of Fluid (VOF) [4]. Используемый численный алгоритм решения уравнений основан на модификации метода SIMPLE [6] с полностью неявной схемой интегрирования [7]. Учет движения твердого тела осуществляется путем использования технологии перекрывающихся сеток [8].



Рис. 2. Карта Балтийского моря

Представленная технология реализована в российском пакете программ ЛОГОС, предназначенном для решения сопряженных трехмерных задач конвективного тепломассопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [5, 9]. Пакет программ ЛОГОС успешно используется для решения различных гидродинамических задач, включая моделирование цунами [3, 10].

В ходе проведенного исследования падения метеорита с различными параметрами в акваторию Балтийского моря были получены оценки и амплитудные характеристики волн цунами на различных участках побережья, в результате падения метеорита как в северную, так и южную части Балтийского моря, а также оценен диаметр метеорита, падение которого в Балтийское море может быть потенциально опасно.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5 и молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9, а также при финансовой поддержке РФФИ - проект № 16-01-00267.

Список литературы

1. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.-Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Yu., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.-H., Li, Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.
2. De Groot-Hedlin C., Hedlin M.A.H. Infrasound detection of the Chelyabinsk meteor at the US Array // Earth and Planetary Science Letters. 2014. V. 402. P. 337-345.
3. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Kurulin V.V., Tyatyushkina E.S., Numerical modeling of the 2013 meteorite entry in Lake Chebarkul, Russia // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2017. V. 17. P. 671–683.
4. Ubbink O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces, PhD, Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science, Technology & Medicine. 1997.
5. Kozelkov A.S., Kurulin V.V., Lashkin S.V., Shagaliev R.M., Yalozo A.V. Investigation of supercomputer capabilities for the scalable numerical simulation of computational fluid dynamics problems in industrial applications // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2016. V. 56. № 8. P. 1506-1516.
6. Ferziger J.H., Peric M. Computational Method for Fluid Dynamics. – Springer-Verlag: New York, 2002. 423 p.
7. Kozelkov A.S., Lashkin S.V., Efremov V.R., Volkov K.N., Tsibereva Y.A., Tarasova N.V. An implicit algorithm of solving Navier–Stokes equations to simulate flows in anisotropic porous media // Computers and Fluids. 2018. V. 160. P. 164–174.
8. Wang Z.J., Parthasarathy V. A Fully Automated Chimera Methodology for Multiple Moving Body Problems // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2000. V. 33. № 7. P. 919-938.
9. Kozelkov A.S., Krutyakova O.L., Kurkin A.A., Kurulin V.V., Tyatyushkina E.S. Zonal RANS–LES Approach Based on an Algebraic Reynolds Stress Model // Fluid Dynamics. 2015. V. 50. № 5. P. 621–628.
10. Kozelkov A., Efremov V., Kurkin A., Pelinovsky E., Tarasova N., Strelets D. Three dimensional numerical simulation of tsunami waves based on the Navier-Stokes equations // Science of tsunami Hazards. 2017. V. 36. No. 4. P.183-196.

E.S. Tyatyushkina, A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE CHELYABINSKY METEORITE DROP IN THE BALTIC SEA BY MEANS OF LOGOS PACKAGE PROGRAMS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod

The results of modeling the meteorite fall into the Baltic Sea, the subsequent wave propagation and their runup on the shore are presented. The calculations were carried out in the LOGO software package within the framework of the three-dimensional Navier-Stokes equations.

Keywords: Navier-Stokes equations, free-surface flow, tsunami, LOGOS

Сведения об авторах

Тятыушкина Елена Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, младший научный сотрудник ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 8(831)436-63-93, leno4ka-07@mail.ru.

Козелков Андрей Сергеевич – д. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, начальник научно-исследовательской лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 8(831)436-63-93, askozelkov@mail.ru.

Куркин Андрей Александрович – д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой «Прикладная математика», научный руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 8(831)436-63-93, aakurkin@gmail.com.