

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ЦУНАМИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ПАДЕНИИ ЛЬДИНЫ НА ВОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ, С УЧЁТОМ РЕАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ МОРСКОГО ДНА

NUMERICAL SIMULATION OF A TSUNAMI WAVE GENERATED BY AN ICE BLOCK IMPACT WITH REALISTIC SEABED TOPOGRAPHY

**E. Kolosovskiy
L. Kataeva**

Summary. This study presents a numerical simulation of tsunami wave formation caused by the impact of an ice block falling into a body of water with a non-uniform bottom profile. As a case study, a basin with a realistic bathymetric profile, characteristic of Arctic coastal zones where large ice masses may detach, is considered. The relevance of the problem is driven by the increasing frequency of such events, which can generate local tsunamis and pose a threat to coastal infrastructure. Special attention is paid to regions with a high probability of glacier front collapses. Despite their potential hazard, these phenomena remain poorly studied in the context of numerical modeling. The mathematical model is based on the one-dimensional shallow water equations under the hydrostatic approximation. The ice block is modeled as a vertically moving rectangular body that displaces water and generates a surface wave. Simulations are performed on a regular grid with a spatial step of 1 meter and a time step of 0.05 seconds. The Lax–Friedrichs scheme is used for numerical integration, providing stable computation in the presence of steep gradients. The model accounts for the physical properties of ice and water, enabling realistic reproduction of the initial wave generation phase. To evaluate the correctness of the implementation, the algorithm was tested on an idealized basin with a rectangular ice-like body. The results demonstrate a characteristic wave pattern: formation of a central surge, subsequent evolution, and gradual attenuation of the wave, confirming the physical reliability of the approach. The model can be easily adapted for various wave generation scenarios and used as a research and educational tool.

Keywords: tsunami, ice block impact, bathymetry, shallow water waves, numerical modeling, Lax–Friedrichs, free surface, one-dimensional model.

Колосовский Егор Владимирович

Нижегородский государственный технический
университет имени Р.Е. Алексеева
e.kolosovskiy@bk.ru

Катаева Лилия Юрьевна

Профессор, Нижегородский государственный
технический университет имени Р.Е. Алексеева
kataeval2010@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается численное моделирование формирования волны цунами, возникающей при падении льдины в водоём с переменным рельефом дна. В качестве примера исследуется акватория с реалистичным профилем глубин, характерная для арктических прибрежных зон, где возможны отколы крупных ледовых масс. Актуальность задачи обусловлена ростом частоты подобных событий, способных инициировать локальные цунами и угрожать береговой инфраструктуре. Особое внимание уделено регионам с высокой вероятностью обрушений ледникового фронта. Несмотря на потенциальную опасность, такие явления остаются слабо изученными в рамках численного моделирования. Математическая модель основана на одномерных уравнениях мелкой воды в гидростатическом приближении. Погружение льдины описывается как вертикальное движение прямоугольного тела, вызывающее вытеснение жидкости и формирование волны. Расчёты выполняются на регулярной сетке с пространственным шагом 1 метр и временным — 0.05 секунды. В качестве численного метода используется схема Лакса–Фридрихса, обладающая хорошей устойчивостью при наличии резких градиентов. Модель учитывает физические свойства льда и воды, позволяя достоверно воспроизводить начальную фазу волнообразования. Для оценки корректности реализации алгоритм протестирован на идеализированной акватории с прямоугольным льдоподобным телом. Результаты демонстрируют характерную структуру возмущения: формирование центрального всплеска, эволюцию и постепенное затухание волны, что подтверждает физическую состоятельность подхода. Модель легко адаптируется к различным сценариям и может использоваться как исследовательский и учебный инструмент.

Ключевые слова: цунами, падение льдины, батиметрия, мелководные волны, численное моделирование, Лакс–Фридрихс, свободная поверхность, одномерная модель.

Введение

С нарастанием темпов климатических изменений и масштабного таяния ледников возрастает актуальность задач, связанных с моделированием волновых процессов, возникающих при отколе крупных ледяных масс. В арктических и субарктических регионах всё чаще фиксируются эпизоды внезапных обрушений ледовых фрагментов в прибрежные акватории. Такие события способны вызывать мощные возмущения свободной поверхности, по механизму близкие к локальным цунами, и представляют потенциальную угрозу для морской инфраструктуры, навигационной безопасности и прибрежных экосистем [1, 2]. Существующие подходы к численному моделированию волн, инициируемых падением тел, ориентированы на взаимодействие с твёрдыми телами [3, 4, 5]. И не учитывают малую плотность льда и склонность к частичному всплытию или формированию колебательных движений в толще воды. В настоящей работе предложена численная модель, позволяющая воспроизвести процесс генерации волны при вертикальном погружении ледяного блока. Расчёты выполняются на регулярной пространственно-временной сетке с шагами 1 метр и 0.05 секунды соответственно. Для аппроксимации потоков выбрана схема Лакса–Фридрихса [6], обладающая хорошими стабилизирующими свойствами при наличии резких градиентов и импульсных воздействий. В отличие от схем высокой точности, она не требует дополнительных ограничений на гладкость решений, устойчива при сильных начальных возмущениях и позволяет надёжно моделировать нестационарные процессы. Начальные условия предполагают покоящуюся водную среду и ледяной блок, начинающий вертикальное движение с поверхности. Для оценки корректности численного алгоритма проведена верификация на основе экспериментальных данных, опубликованных в работе [7]. Верифицированная модель даёт глубину каверны $H_{in} = 3,0$ против 3,3 в работе [7], высота положительного гребня составила $H_{out} = 1,09$ м против 1,2 м. Таким образом, расхождение между численной моделью и эталонными экспериментальными данными не превышает ~ 8 %, что подтверждает физическую состоятельность и корректную реализацию алгоритма. Предложенная модель позволяет изучить влияние физических параметров льдины, геометрии дна и характера взаимодействия с жидкостью на формирование волнового фронта. В перспективе она может быть расширена до многомерных постановок с учётом вязкости, поперечных эффектов и других физических факторов, что открывает широкие возможности для дальнейших исследований.

Цель исследования — численное моделирование формирования волны, возникающей в результате вертикального погружения ледяного блока в водную среду с реальным рельефом дна [8–10].

Математическая формулировка задачи

В настоящей работе решается задача численного моделирования начальной фазы формирования волны, возникающей при вертикальном падении ледяного блока в водоём с переменным рельефом дна [10]. Для описания течения используется система одномерных уравнений мелкой воды в гидростатическом приближении [11–15]. Падение льда моделируется как вертикальное движение прямоугольного твёрдого тела с конечной скоростью [16]. В фазе погружения блок вытесняет объём воды, создавая возмущение свободной поверхности. Расчёты учитывают геометрию и плотность льда, что позволяет аппроксимировать взаимодействие с водой через источники массы и импульса [17, 18]. Введён буферный механизм: вытесненный объём аккумулируется и высвобождается в воду с заданным временным профилем, обеспечивая более реалистичную передачу энергии в волновую систему. Для численного решения применяется схема Лакса–Фридрихса [6] — устойчивая разностная схема первого порядка, надёжно работающая при наличии резких градиентов. Пространственно-временная дискретизация регулярна и удовлетворяет условию Куранта: шаг по пространству составляет 1 метр, шаг по времени — 0.05 секунды. Модель применима для мелководных акваторий с глубиной до 200 метров, при условии, что длина волны существенно превышает глубину.

Постановка задачи

В настоящем исследовании решается задача численного моделирования процесса формирования волны, возникающей в результате вертикального движения льдиноподобного тела в ограниченной водной среде [19–21]. Источником возмущения — ледяной блок с заданными геометрическими и физическими параметрами, погружающийся в воду с начальной скоростью. Батиметрия задаётся дискретным массивом глубин и проецируется на расчётную сетку [1, 2]. Движение ледяного тела задаётся в виде внешнего воздействия, направленного вертикально вниз, без учёта его внутренней деформации или взаимодействия с атмосферной средой [22, 23]. Граничные условия на концах области моделирования принимаются открытыми, что исключает отражение волны и позволяет наблюдать её свободное распространение. В ходе расчёта фиксируются: амплитуда волны, форма фронта, скорость распространения, а также влияние формы дна и характеристик тела на структуру возмущения [24].

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе численного моделирования были получены пространственные профили уровня воды и скорости течения в различные моменты времени, что позволило

проследить формирование и эволюцию волны, вызванной вертикальным погружением льдины. Ледяной блок размерами $4 \times 3 \times 2$ м погружается в воду с начальной скоростью, соответствующей потенциальной энергии падения. Из-за значительного объёма тела происходит практически полное погружение до дна, что инициирует вытеснение большого объёма жидкости и образование выраженного импульсного возмущения. Максимальная амплитуда волны, зафиксированная в расчетах, достигает $\eta \sim 1,24$ м в зоне максимального подъёма, что сопоставимо с результатами экспериментальных исследований аналогичных сценариев. Волна распространяется в обе стороны от точки падения, её скорость и структура чувствительно зависят от локального рельефа дна. Влияние батиметрии проявляется на поздних стадиях, вызывая искажение формы фронта и перераспределение энергии. Ниже приведены ключевые этапы эволюции волнового процесса, отражённые на рисунке 1. Момент времени $t = 1.20$ с показывает начальную стадию гене-

рации волны и соответствует начальному погружению льдины — волновое возмущение ещё не сформировано. График скорости указывает на небольшой локальный импульс в районе погружения. При $t = 6.25$ с — фронт волны удаляется от точки воздействия и формируются первичная депрессия — отрицательное смещение свободной поверхности над зоной падения. На графике скорости наблюдаются выраженные положительная и отрицательная компоненты — зарождение двух волн, направленных в разные стороны. В момент времени $t = 9.65$ с волна продолжает распространяться, дисперсия распространяется, а за ней формируется положительный фронт волны, а из графика скорости видно, что часть жидкости уходит к берегу, другая — в противоположном направлении. Видна инерционная составляющая, указывающая на сложный характер взаимодействия. Фазу, в которой волна достигает, более удалённой области соответствует моменту времени $t = 16.75$ с. Видно, что фронт становится максимально растянутым,

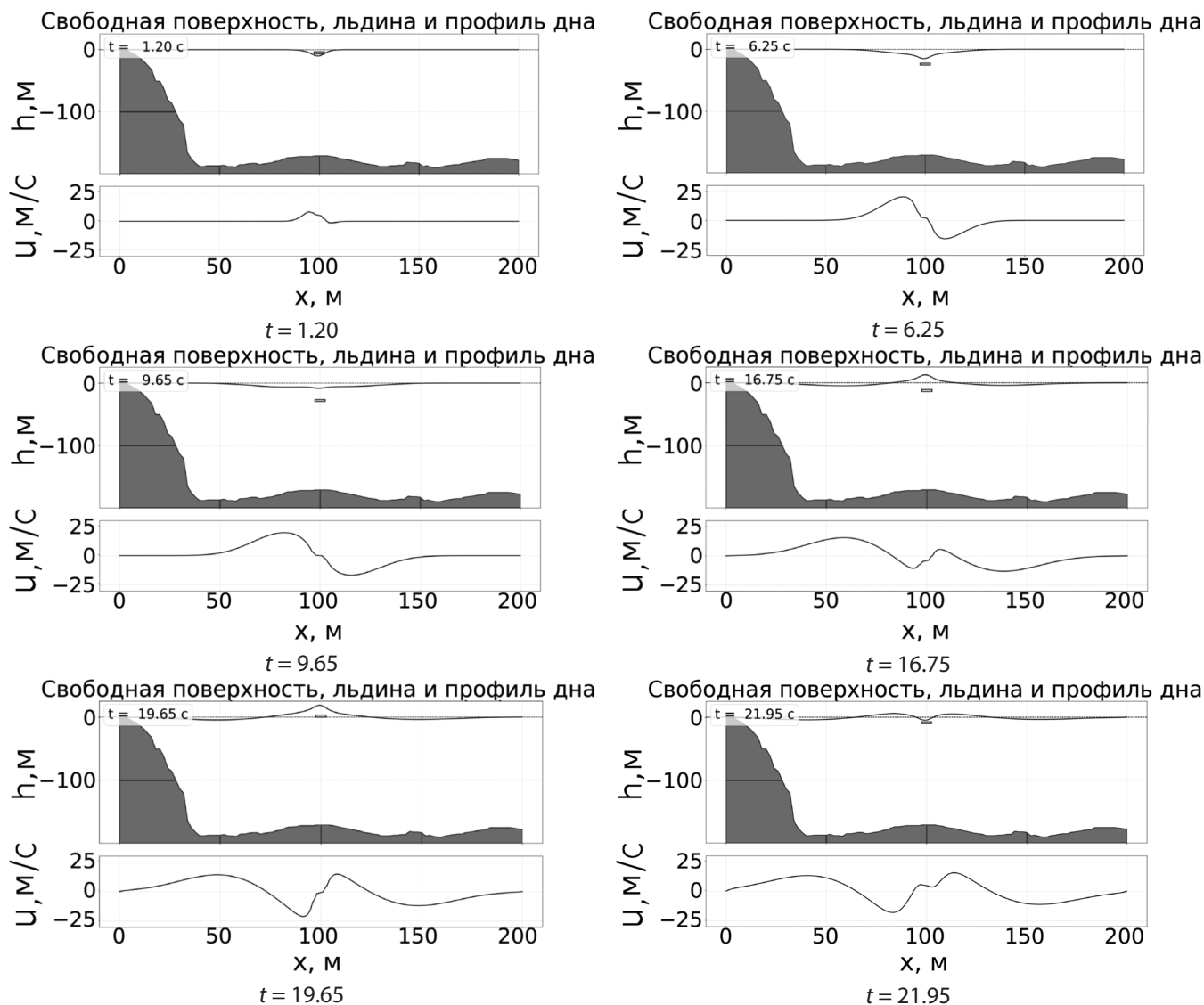


Рис. 1. Динамик формирования и деформации волны при падении льда

но сохраняет видимую структуру при этом наблюдается чётко выраженная волна положительной амплитуды (пик возвышения), а на графике скорости наблюдается характерный максимум у переднего фронта волны. Влияние батиметрии на искажение волны показано в момент времени $t = 19.65$ с. Для этого момента времени основная волна достигла пологой части дна и волновой фронт начинает искажаться под действием батиметрии: передняя часть замедляется, задняя — настигает её и появляется второй максимум скорости — отражение сложного фронта.

Момент деформации формы волна соответствует $t = 21.95$ с видно, что происходит растяжение и перераспределение энергии, высота волны снижается, а структура становится более симметричной. Скорость жидкости показывает смешанные зоны направлений — волна

частично отражается и интерферирует с собственной хвостовой частью. Таким образом, более объёмный или тяжёлый блок льда приводит к более высокой волне; сложный рельеф дна вызывает асимметрию фронта; форма волны зависит от глубины, скорости и времени погружения; взаимодействие фронта с береговой линией может вызывать вторичные волны и интерференцию. Полученные результаты подтверждают, что даже в рамках одномерной постановки возможно достоверное воспроизведение ключевых характеристик волнового процесса, вызванного падением льдины. Модель показала высокую чувствительность к начальному импульсу и конфигурации дна, что делает её подходящим инструментом для сценарного анализа в арктических условиях. Это открывает перспективы использования модели для сценарного анализа в условиях реальных арктических акваторий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев И.И., Бузин И.В. Ледники российской Арктики и айсберги как потенциальная угроза морскому транспорту и добыче на шельфе // Сборник статей. — М.: Институт географии РАН; Арктический и антарктический НИИ Росгидромета, 2016. — С. 161–166. (дата обращения: 21.07.2025).
2. Кашдан А.И., Шейнкман В.С. Различия в подвижках древних ледников в Баренцевом и Карском море // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — 2023. — № 10. — С. 116–122. (дата обращения: 21.07.2025).
3. Gallati M., Braschi G. SPH Simulation of the Wave Produced by a Block Falling into a Water Tank // Proceedings of the 12th International Conference on Fluid Flow Technologies (CMFF'03), Budapest, Hungary, September 3–6, 2003. — University of Pavia, Hydraulic and Environmental Engineering Department (HEED). URL: <https://www.unipv.it/web/guest/ateneo/strutture/dipartimenti/ingegneria-idraulica-e-ambientale> (дата обращения: 21.07.2025).
4. Mohammed F., Fritz H.M. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides // J. Geophys. Res., 2012. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JF002358> (дата обращения: 21.07.2025).
5. Tripepi G., Casella F., Aristodemo F., Filianoti P., et al. The solitary wave run-up on sloped beaches protected by submerged rigid breakwaters // Ocean Engineering. 2023. Vol. 281. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823001234> (дата обращения: 21.07.2025).
6. Yulianti K., Marwati R., Permatahati S. A modified Lax–Friedrichs method for the numerical solution of shallow water equations // EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems. 2019. Vol. 6, No. 18. DOI: 10.4108/eai.6-12-2019.162973. URL: <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.6-12-2019.162973> (дата обращения: 21.07.2025).
7. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Моделирование падения тела в воду в различных условиях на основе численного решения уравнений Навье–Стокса полностью неявным методом // Акустический журнал. 2023. Т. 69, № 3. С. 341–349.
8. Гусев О.И., Хакимзянов Г.С. Численное моделирование распространения длинных поверхностных волн по вращающейся сфере в рамках полной нелинейно-дисперсионной модели // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 3. С. 3–32.
9. Шокин Ю.И., Бейсель С.А., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Численное моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 1. С. 99–112. (дата обращения: 21.07.2025).
10. Беликов В.В., Алексюк А.И., Васильева Е.С. Численное моделирование волн прорыва: монография. — М.: Российская академия наук, 2023. — 304 с. (дата обращения: 21.07.2025).
11. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Моделирование падения тела в воду в различных условиях на основе численного решения уравнений Навье–Стокса полностью неявным методом // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2015. № 3(110). С. 51–69. (дата обращения: 21.07.2025).
12. Гриневич Д.В., Бузник В.М., Нужный Г.А. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда // Труды ВИАМ. 2020. № 8. С. 109–122. (дата обращения: 21.07.2025).
13. Ju J.-L., Yang N.-N., Zhang Y.-F., et al. Numerical Simulation of the Horizontal Water-Entry Process of High-Speed Vehicles // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 11. Article 2062. DOI: 10.3390/jmse12112062. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/11/2062> (дата обращения: 21.07.2025).
14. Meng Z.-F., Ming F.-R., Wang P.-P., Zhang A.-M. Numerical simulation of water entry problems considering air effect using a multiphase Riemann-SPH model // Advances in Aerodynamics. 2021. Vol. 3. Article 13. DOI: 10.1186/s42774-021-00063-1. URL: <https://advancesinaerodynamics.springeropen.com/articles/10.1186/s42774-021-00063-1> (дата обращения: 21.07.2025).
15. Wang C., Wang J., Wang C., Zhang Y., et al. Numerical Study on Wave–Ice Floe Interaction in Regular Waves // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, No. 12. Article 2235. DOI: 10.3390/jmse11122235. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/12/2235> (дата обращения: 21.07.2025).

16. Mazova R.Kh., Kurkin A.A., Giniyatullin A.R., Tyuntyayev C.M. Earthquake of 30 October 2020 in the Aegean Sea: numerical simulation of the generation and propagation of tsunami waves // *Science of Tsunami Hazards*. 2021. Vol. 40, No. 3. P. 178–195. URL: https://www.tsunamiwave.info/volume40_3/mazova.pdf (дата обращения: 21.07.2025).
17. Kolerski T. Mathematical Modeling of Ice Dynamics as a Decision Support Tool in River Engineering // *Water*. 2018. Vol. 10, No. 9. Article 1241. DOI: 10.3390/w10091241. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/9/1241> (дата обращения: 21.07.2025).
18. Vuong T.-H.-N., Wu T.-R., Wang C.-Y., Chu C.-R. Modeling the Slump-Type Landslide Tsunamis. Part II: Numerical Simulation of Tsunamis with Bingham Landslide Model // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 19. Article 6872. DOI: 10.3390/app10196872. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6872> (дата обращения: 21.07.2025).
19. Петрухин Н.С., Катаева Л.Ю., Мазова Р.Х., Донис Н.М. Численное моделирование волны цунами от оползня // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2004. Т. 9. С. 54–62. (дата обращения: 21.07.2025).
20. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Катаева Л.Ю., Баранов Б.В. Генерация и распространение катастрофических цунами в акватории Охотского моря. Возможные сценарии // *Доклады Российской академии наук*. 2006. Т. 410, № 4. С. 528–531. (дата обращения: 21.07.2025).
21. Chen F., Heller V., Briganti R. Numerical modelling of tsunamis generated by iceberg calving: validated with large-scale laboratory experiments // *Advances in Water Resources*. 2020. Vol. 142. Article 103647. DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103647. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030917082030121X> (дата обращения: 21.07.2025).
22. Liu Q., Hu C., Wang X. Numerical study of waves generated during iceberg calving in sliding mode // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 262. Article 113875. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002980182200390X> (дата обращения: 21.07.2025).
23. Hu C., Wang X., Liu Q. Characteristics of iceberg calving-generated waves based on three-dimensional SPH simulations // *Coastal Engineering*. 2022. Vol. 179. Article 104854. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2022.104854. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838392200068X> (дата обращения: 21.07.2025).
24. Forouzi Feshalami B., Løset S., Lubbad R., Lu W., Skourup H., Kashafutdinov M. A numerical model for the simulation of wave-induced erosion of floating icebergs: implementation and validation against wave flume data // *Journal of Ocean Engineering and Science*. in press 2025. DOI: 10.1016/j.joes.2025.102345. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588921125001234> (дата обращения: 21.07.2025).

© Колосовский Егор Владимирович (e.kolosovskiy@bk.ru); Катаева Лилия Юрьевна (kataeval2010@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»