

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.137

Использование сеточно-характеристического метода на химерных сетках для исследования морфометрических характеристик киля тороса

Песня Е.А., Муратов М.В., Фаворская А.В., Кожемяченко А.А.

Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>

г. Долгопрудный 141700, Московская область, Российская Федерация

E-mail: pesnya.ea@phystech.edu, max.muratov@gmail.com, aleanera@yandex.ru, kozhemiyachenko@yandex.ru

Поступила 24.11.2023, рецензирована 30.11.2023, принята 07.12.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН И.Б. Петровым

Аннотация: При проектировании инженерных сооружений в арктической зоне необходимо учитывать нагрузки, передаваемые конструкции сооружения, при столкновении с различными ледовыми образованиями: айсбергами, торосами, стамухами. В работе рассматривается использование сеточно-характеристического метода для моделирования прохождения упругих волн в поперечном срезе тороса с учетом его пористости в консолидированном слое и в нижней части киля. Для учета криволинейной формы пор, заполненных воздухом или водой, предложено использовать химерные (наложенные) расчетные сетки. В результате компьютерного моделирования решена прямая задача ультразвукового исследования тороса, получены поля вектора скорости в различные моменты времени, в том числе система переотражений от пор.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, сеточно-характеристический метод, морфометрия тороса, ультразвуковое исследование

УДК 519.63

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 21-71-10015.

Для цитирования: Песня Е.А., Муратов М.В., Фаворская А.В., Кожемяченко А.А.. Использование сеточно-характеристического метода на химерных сетках для исследования морфометрических характеристик киля тороса. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):137-142. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.137.

The grid-characteristic method on chimeric meshes application to study the keel morphometric characteristics of ice ridges

Evgeniy A. Pesnya, Maxim V. Muratov, Alena V. Favorskaya, Anton A.

Kozhemyachenko

Moscow Institute of Physics and Technology, <https://mipt.ru/>

Dolgoprudny 141700, Moscow region, Russian Federation

E-mail: pesnya.ea@phystech.edu, max.muratov@gmail.com, aleanera@yandex.ru, kozhemiyachenko@yandex.ru

Received November 24, 2023, peer-reviewed November 30, 2023, accepted December 07, 2023, published March 15, 2024.

Abstract: Designing engineering structures in the Arctic zone requires to consider the loads transmitted to the structure construction in connection with collisions with various ice formations: icebergs, ice ridges, stamukhs. The paper considers the use of the grid-characteristic method for modeling the passage of elastic waves in a cross-section of the ice ridge together with its porosity in the consolidated layer and in the lower part of the keel. We propose to use chimeric (overlapped) computational meshes for the describing curvilinear shape of pores filled with air or water. As a result of computer simulation, the direct problem of ultrasound investigation of the ice ridge has solved, velocity vector fields have obtained at various moments in time, including a system of reflections from pores.

Keywords: computer simulation, grid-characteristic method, ice ridges morphometry, ultrasound investigation

UDC 519.63

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 21-71-10015..

For citation: Evgeniy A. Pesnya, Maxim V. Muratov, Alena V. Favorskaya, Anton A. Kozhemyachenko. The grid-characteristic method on chimeric meshes application to study the keel morphometric characteristics of ice ridges. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):137-142e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.137.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (138)
 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (139)
 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (140)
 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (141)
- ЛИТЕРАТУРА (141)

1. ВВЕДЕНИЕ

На безопасность эксплуатации нефтедобывающих сооружений, судоходства в арктических регионах влияют нагрузки при взаимодействии с торосами. Для получения проектных оценок ледовых нагрузок на инженерные сооружения необходимо проводить морфометрический анализ характеристик таких ледовых образований. Торосом называют ледяные гребни, образованные в результате сжатия ледяного покрова, при этом надводная часть тороса называется парусом, а подводная – килем. Например, в [1-2] приведена информация о морфометрии и внутренней структуре тороса первого года образования с помощью электротермического бурения в ледовом лагере Барнео. При этом для исследования нижней части торосов принято использовать гидролокационные подходы [3]. Большой набор статистических данных об осадке льда, глубине килея, собранный направленными вверх гидролокаторами, приведен в [4] для пяти участков Баренцева моря. Другой морфометрический анализ килея торосов первого года формирования с использованием гидролокаторов был проведен в [5], где сделано предположение, что лучшим обобщением формы гребней первого года является трапециевидная форма килея. В [6] проведен мониторинг килей торосов с помощью гидролокаторов, расположенных на мосту в Нортумберлендском проливе. Форма килей была классифицирована как одна из

четырёх форм: треугольная, трапециевидная, w-образная и кили с несколькими пиками. Наблюдаемые распределения величин глубины килея были сравнены с расчетными. В [7] ледяной покров и ледяной гребень моделируются в виде тонких эластичных пластин для рассмотрения взаимодействия волн с круглым телом, захваченным тонким слоем морского льда, проводится аналитический анализ воздействия волн на круговой ледяной гребень, встроенный в ледяной покров. В [8-9] предложен вероятностный метод, основанный на поиске взаимосвязи между уровнями осадки льда, осадки килея тороса и частотой образования гребней, для оценки нагрузок, передаваемых на морские сооружения. Проведенный анализ сезонных данных, полученных с помощью гидролокаторов в море Бофорта, об уровнях осадки льда, килея ледяного гребня, частоте образования гребней позволил получить вероятностные аналитические подходы для моделирования возраста гребня, определения формулы роста консолидированного слоя и исследования его толщины. На основе полевого эксперимента по укреплению искусственной ледяной гряды в [10] получены аналитические и двумерные дискретные численные подходы моделирования для прогнозирования толщины консолидированного слоя при вероятностном анализе воздействия льда на сооружения, требующие в качестве входных данных информации о метеорологических условиях и общих физико-механических свойствах льда. При этом численное моделирование уровня льда и консолидации гряды было выполнено с помощью метода конечных элементов, а положение границы лед-вода определялось из условия энергетического баланса Стефана.

В [11] для изучения строения ледовых гребней различной конфигурации используется

сеточно-характеристический метод на структурированных регулярных расчетных сетках и был проведен сравнительный анализ полученных с помощью полноволнового моделирования сейсмограмм. Для решения уравнений математической физики в последнее время стали использоваться химерные или перекрывающиеся расчетные сетки, которые ранее применялись для решения гидродинамических задач [12-13]. Сеточно-характеристический метод с использованием химерных сеток позволяет описывать границы сложной формы [14-15], в том числе контактные [16] или не сонаправленные с координатными осями [17-19]. В настоящей работе для описания криволинейных полостей, заполненных воздухом или водой, применяется сеточно-характеристический метод с использованием химерных регулярных расчетных сеток.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для численного моделирования задачи распространения волнового сигнала в торосе совместно рассматриваются системы уравнений для изотропной линейно-упругой среды и для акустической среды, которые в общем случае могут быть сведены к следующей системе уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

где в (1) \mathbf{u} – вектор искомых функций.

В случае линейно-упругой среды в качестве вектора искомых функций рассматриваются $\mathbf{u} = (v_x, v_y, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy})^T$, т.е. компоненты скорости распространения возмущения \mathbf{v} и компоненты симметричного тензора напряжений Коши σ . Матрицы $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ имеют набор собственных значений $\{c_p, -c_p, c_s, -c_s, 0\}$, где c_p – скорость распространения продольных волн, c_s – скорость распространения поперечных волн.

В случае акустической среды искомыми функциями являются $\mathbf{u} = (v_x, v_y, p)^T$, т.е. компоненты скорости распространения возмущения \mathbf{v} и давление p . Матрицы имеют набор собственных значений $\{c_p, -c_p, 0\}$.

Таким образом, системы уравнений (1), описывающие линейно-упругое тело и акустическую среду, являются гиперболическими,

а значит в обоих случаях матрицы $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ могут быть представлены в виде

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Omega}^{-1},$$

где матрица $\mathbf{\Omega}$ состоит из столбцов, являющимися правыми собственными векторами исходной матрицы, которые, в свою очередь, отвечают собственным значениям, которые являются элементами диагональной матрицы $\mathbf{\Lambda}$. Расщепляя систему (1) по пространственным направлениям, переходим к инвариантам Римана $\omega \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{u}$, которые переносятся по характеристикам гиперболической системы, получим гиперболическую систему из линейных уравнений переноса с постоянными коэффициентами в инвариантах Римана

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{\Lambda} \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

Система в инвариантах Римана (2) на верхнем слое по времени может быть численно проинтегрирована с использованием конечно-разностных схем, например, при помощи схемы Русанова [16], используемой при расчетах в настоящей работе, третьего порядка по времени и пространству. Для перехода к компонентам \mathbf{v} и σ или \mathbf{v} и p соответственно на верхнем слое по времени после расчета инвариантов Римана используется обратное преобразование $\mathbf{u} = \mathbf{\Omega} \omega$.

Принципиальная модель устройства ледового гребня приведена на **Рис. 1**, где красным сечением схематично показана расчетная область при рассмотрении нижней части киля тороса. На **Рис. 2** и **Рис. 3** приведены расчетные области 16 на 16 метров, в которых исследовались сейсмические отклики от полостей и пор, заполненных воздухом или водой, для случая задания источника в консолидированном слое тороса и в морской воде при рассмотрении нижней части киля соответственно. Характеристики сред

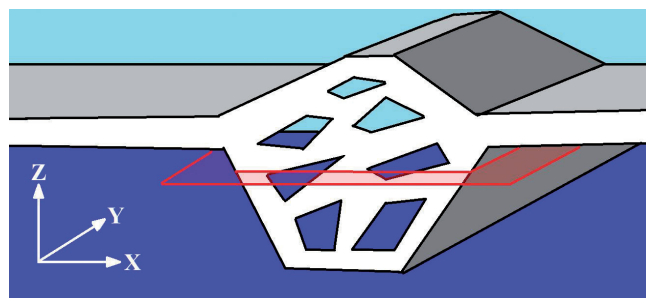


Рис. 1. Принципиальная модель ледового гребня (тороса).

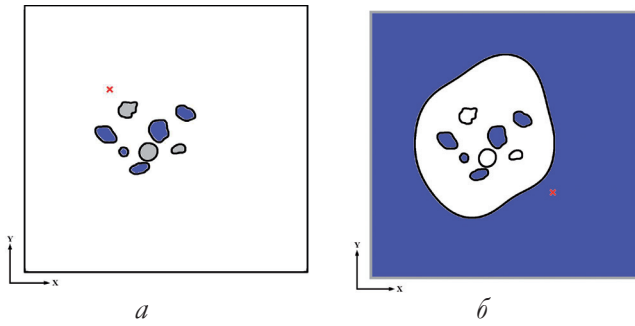


Рис. 2. Поперечный срез ледового гребня с полостями, заполненными воздухом (серые области) или водой (синие области): а – в консолидированном слое, б – в нижней части килля.

Таблица 1

Параметры моделируемых сред

Среда	Скорость Р-волн, м/с	Скорость S-волн, м/с	Плотность, кг/м ³
Лед	3940	2493	917
Вода	1500	-	1000

приведены в **Таблице 1**. Стоит отметить, что, изменяя соответствующие параметры среды, можно рассматривать ледовые образования с различной соленостью и температурным режимом.

На границах раздела сред лед-воздух, ставились условия свободной границы

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = 0,$$

где \mathbf{n} – нормаль к соответствующей границе.

На границе раздела сред лед-вода (1 и 2 среды соответственно) ставилось следующее контактное условие:

$$\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{n} = \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{n},$$

$$\sigma_1 \cdot \mathbf{n} + p \cdot \mathbf{n} = 0,$$

здесь \mathbf{n} – нормаль к границе контактирующей среды 1.

На границах расчетной области на Рис. 2 используются неотражающие граничные условия. В качестве начального возмущения использовался импульс Рикера с частотой 25 кГц, местоположение источника отмечено на Рис. 2 красным крестом.

В расчете области интегрирования на Рис. 2 покрывались фоновыми прямоугольными расчетными сетками и криволинейными химерными сетками с характерным пространственным шагом 10^{-2} м, шаг интегрирования по времени составлял $2.54 \cdot 10^{-7}$ с. Пример расположения фоновой и наложенных сеток для полостей, заполненных воздухом и водой, представлен

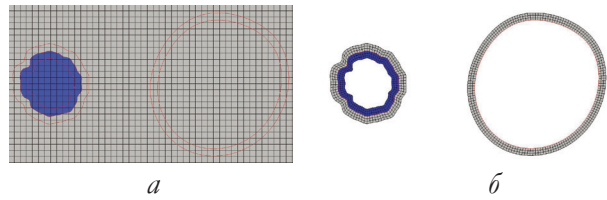


Рис. 3. Пример конфигурации расчетных сеток: а – фоновая сетка, б – химерные сетки.

на **Рис. 3**. В узлах фоновой сетки содержится информация о параметрах среды, так на Рис. 3а серым цветом выделен лед, синим цветом – вода. При этом для описания полостей в приграничной области расчет ведется с использованием наложенных сеток согласно Рис. 3б, что с учетом поставленных граничных условий и алгоритма взаимной интерполяции [18] позволяет провести корректный расчет распространения волнового сигнала по водным порам и не учитывать в расчете области, заполненные воздухом.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На **Рис. 4** и **Рис. 5** приведены результаты полноволнового моделирования распространения возмущения и волновых откликов от рассматриваемых полостей в различные моменты времени в случае

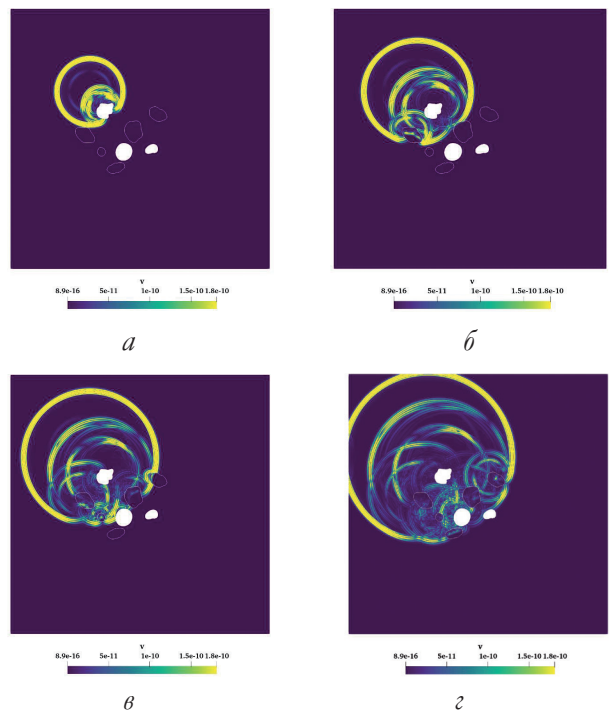


Рис. 4. Распространение волновых откликов от системы полостей в срезе, расположенном в консолидированном слое: а – 0.014 с, б – 0.021 с, в – 0.027 с, г – 0.034 с.

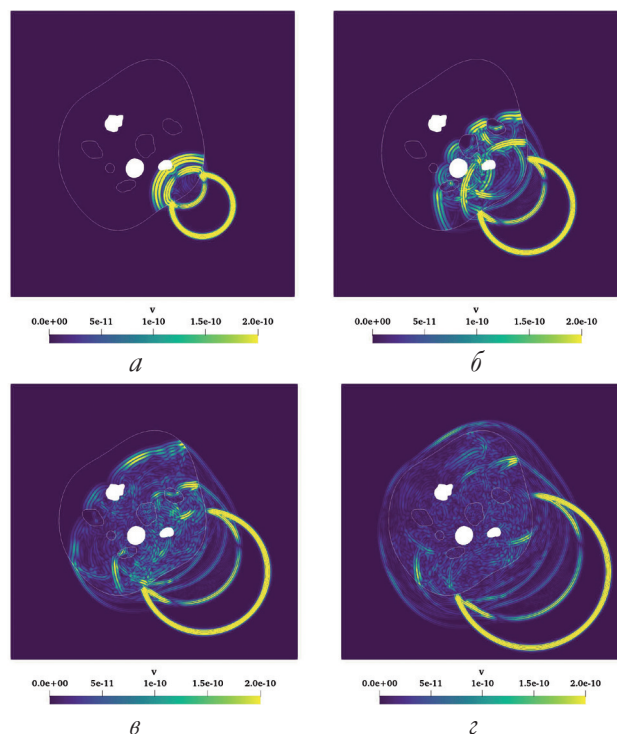


Рис. 5. Распространение волновых откликов от системы полостей в срезе, расположенном в нижней части кия: а – 0.030 с, б – 0.045 с, в – 0.060 с, з – 0.075 с.

рассмотрения расчетной области в консолидированном слое тороса и нижней части его кия соответственно.

На Рис. 4а формируется первый отклик от полости, заполненной воздухом, на Рис. 4б начальный импульс переотражается от поры, заполненной водой, при этом часть волнового фронта проходит сквозь пору. На Рис. 4в и Рис. 4г показана сложная система переотражений от всех оставшихся пор и полостей.

На Рис. 5а происходят первые переотражения от самого кия тороса и первой полости, в дальнейшем формируются новые отраженные сигналы от других полостей, выходящие из ледяной поверхности кия в воду на Рис. 5б и Рис. 5в, а на Рис. 5г исходный сигнал полностью проходит толщину кия.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием сеточно-характеристического метода на структурированных прямоугольных и химерных регулярных расчетных сетках решена прямая задача прохождения ультразвукового сигнала по торосу и получены результаты полноволнового моделирования вектора скорости в различные моменты времени.

Предложенный подход позволяет учитывать сложную геометрию и структуру, пористость ледового гребня. Полученные алгоритмы и модели могут быть использованы для получения и анализа синтетических сейсмограмм, по которым можно определить ряд морфометрических параметров тороса, при решении обратной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kharitonov VV. Morphometry and unusual internal structure of ice ridge investigated at Barneo ice camp in April 2013. *Polar Science*, 2022, 31:100736.
2. Kharitonov VV, Borodkin VA. On the results of studying ice ridges in the Shoka-I'skogo Strait, part I: Morphology and physical parameters in-situ. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 174:103041.
3. Mironov YU, Guzenko RB, Porubaev VS, Kharitonov VV, Khotchenkov SV and Nesterov AV. Morphometric Parameters of Stamukhas in the Laptev Sea. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2019, 29(4):383-390.
4. Hansen E, Ervik Å, Eik K, Olsson A, Teigen SH. Long-term observations (2014–2020) of level ice draft, keel depth and ridge frequency in the Barents Sea. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 216:103988.
5. Ekeberg O, Høyland K, Hansen E. Ice ridge keel geometry and shape derived from one year of upward looking sonar data in the Fram Strait. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 109:78-86.
6. Obert KM, Brown TG. Ice ridge keel characteristics and distribution in the Northumberland Strait. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 66(2-3):53-64.
7. Mandal S, Law AW, Shen HH. Wave interactions with circular ice ridge embedded in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 155:90-99.
8. Samardžija I, Høyland K, Leira BJ, Naess A. Consolidated layer thickness in probabilistic simulation of first-year ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 216:104021.
9. Samardžija I, Høyland K. Analysis of the relationship between level ice draft, ridge frequency and ridge keel draft for use in the probabilistic assessment of ice ridge loads on

- offshore structures. *Ocean Engineering*, 2023, 270:113593.
10. Salganik E, Høyland K, Shestov A. Medium-scale experiment in consolidation of an artificial sea ice ridge in Van Mijenfjorden, Svalbard. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 181:103194.
 11. Favorskaya AV, Muratov MV. Ultrasonic Study of Sea Ice Ridges. In: Czarnowski I, Howlett RJ, Jain LC (eds). *Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 309, pp 259–268. Springer, Singapore.
 12. Henshaw WD, Schwendeman DW. Parallel computation of three-dimensional flows using overlapping grids with adaptive mesh refinement. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(16):7469-7502.
 13. Chang XH, Ma R, Wang NH, Zhao Z, Zhang LP. A Parallel Implicit Hole-cutting Method Based on Background Mesh for Unstructured Chimera Grid. *Computers & Fluids*, 2020, 198:104403.
 14. Favorskaya AV, Khokhlov NI, Petrov IB. Grid-Characteristic Method on Joint Structured Regular and Curved Grids for Modeling Coupled Elastic and Acoustic Wave Phenomena in Objects of Complex Shape. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2020, 41(4):512-525.
 15. Kozhemyachenko A, Favorskaya A, Pesnya E, Stetsyuk V. Modification of the Grid-Characteristic Method on Chimera Meshes for 3D Problems of Railway Non-Destructive Testing. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2023, 44(1):376-386.
 16. Favorskaya A, Khokhlov N. Accounting for curved boundaries in rocks by using curvilinear and Chimera grids. *Procedia Computer Science*, 2021, 192:3787-3794.
 17. Khokhlov N, Favorskaya A, Stetsyuk V, Mitskovets I. Grid-characteristic method using Chimera meshes for simulation of elastic waves scattering on geological fractured zones. *Journal of Computational Physics*, 2021, 446(1):110637.
 18. Mitskovets Ivan A. Application of Chimeric Meshes for Explicit Accounting for Inhomogeneities in Modeling the Propagation of Elastic Waves. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2): 185-192e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.185.
 19. Favorskaya AV, Khokhlov N. Using Chimera Grids to Describe Boundaries of Complex

Shape. In: Czarnowski I, Howlett RJ, Jain LC. (eds). *Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 309, pp 249–258. Springer, Singapore.

Песня Евгений Александрович*аспирант*

Московский физико-технический институт,
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

E-mail: pesnya.ea@phystech.edu**Муратов Максим Викторович***к.ф.-м.н.*

Московский физико-технический институт,
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

E-mail: max.muratov@gmail.com**Фаворская Алена Владимировна***д.ф.-м.н., доцент*

Московский физико-технический институт,
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

E-mail: aleanera@yandex.ru**Кожемяченко Антон Андреевич***к.ф.-м.н.*

Московский физико-технический институт,
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

E-mail: anton-kozhemyachenko@yandex.ru.