

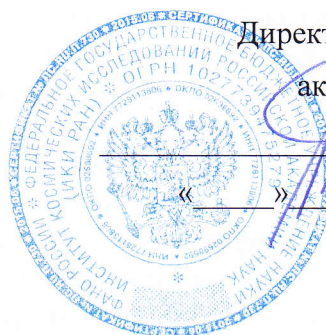
УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН

академик РАН

/Зелёный Л.М./

2015 года



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

научно-технического совета отдела «Физики планет»
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Диссертация Рудермана Михаила Соломоновича на тему «Изгибные волны и колебания в магнитных трубках в солнечной атмосфере» выполнена в отделе 53 Института космических исследований Российской академии наук.

В 1971 году соискатель окончил механико-математический факультет Московского государственного университета по специальности «механика». В 1978 году соискатель защитил кандидатскую диссертацию "Распространение нелинейных МГД волн в плазме с холловской дисперсией" по специальности «механика жидкости, газа и плазмы» в диссертационном совете при Институте космических исследований СССР. В период подготовки диссертации на соискание степени доктора наук соискатель работал в Институте космических исследований РАН в должности ведущего научного сотрудника.

По результатам рассмотрения диссертации «Изгибные волны и колебания в магнитных трубках в солнечной атмосфере» принято следующее заключение:

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Рудермана Михаила Соломоновича посвящена исследованию изучению изгибных волн и колебаний в магнитных трубках в солнечной атмосфере.

Магнитное поле играет очень важную роль в динамике солнечной атмосферы. Его роль особенно выражена в короне, где магнитное давление значительно превосходит давление плазмы. В силу этого в короне характерные масштабы изменения магнитного поля, как правило, весьма велики. Однако пространственный масштаб изменения плотности плазмы может быть очень небольшим. В результате альвеновская скорость может меняться на очень малых масштабах. Замагниченная плазма с областями быстрого изменения альвеновской скорости обычно называется плазмой с магнитной структурой. Уже наблюдения на Skylab в 70-х годах прошлого столетия показали, что плазма солнечной атмосферы это типичная плазма с магнитной структурой. Эти результаты были подтверждены наблюдениями на более поздних поколениях космических аппаратов.

В однородной замагниченной плазме в магнитогидродинамическом приближении могут распространяться только три волновые моды: альвеновские и быстрые и медленные магнитозвуковые. Наличие магнитной структуры приводит к появлению большого количества новых волновых мод. В частности, становится возможным существование поверхностных волн, энергия которых сосредоточена вблизи некоторой поверхности, а амплитуда быстро убывает при удалении от этой поверхности.

Тот факт, что атмосфера Солнца а также, по-видимому, атмосферы многих звёзд являются плазмой с магнитной структурой привлёк внимание теоретиков к исследованию МГД волн в такой плазме. Этой проблеме было посвящено большое число публикаций в 70-х и 80-х годах прошлого столетия. В этих работах рассматривались простейшие магнитные структуры в плазме: магнитный разрыв, являющийся частным случаем тангенциального МГД разрыва, магнитный слой и магнитная трубка. Из этих трёх структур наибольший интерес представляет магнитная трубка, поскольку она может рассматриваться как простейшая модель корональных магнитных петель, а также некоторых магнитных конфигураций в фотосфере и хромосфере.

Интерес теоретиков к МГД волнам в плазме с магнитной структурой значительно усилился после первого наблюдения поперечных колебаний корональных петель на TRACE (Transition Region and Corona Explorer) в 1998-ом году. Эти колебания были интерпретированы как изгибные колебания магнитных трубок. Позже кроме стоячих волн в корональных петлях также наблюдались распространяющиеся волны. Изгибные волны также наблюдаются в волокнах протуберанцев и магнитных трубках в фотосфере и хромосфере.

Хотя изгибные волны в магнитных трубках сами по себе представляют весьма интересный феномен достойный всестороннего изучения, их основное значение определяется тем, что они являются одним из основных инструментов новой и быстро развивающейся ветви солнечной физики - корональной сейсмологии. В частности, наблюдения стоячих волн в корональных петлях используются для оценки величины магнитного поля, а отклонение отношения периодов фундаментальной моды и первого обертона от 2 связано с изменением плотности вдоль петли. Было показано, что, при достаточно разумных предположениях относительно формы петли и параметров магнитного поля и плазмы, величина отклонения отношения периодов от 2 однозначно связана с отношением высоты петли к шкале высот в короне. Таким образом, был разработан метод оценки шкалы высот в короне.

Изгибные волны в магнитных трубках являются лишь одной модой из большого числа волновых мод, которые могут существовать в плазме с магнитной структурой. Однако, благодаря их особому значению для солнечной физики, они продолжают привлекать повышенное внимание исследователей с самого момента их первого наблюдения в 1998-ом году. В первых теоретических работах, посвящённых изгибным волнам в солнечной атмосфере, использовалась простейшая модель прямой магнитной трубки с однородной плотностью плазмы. Однако довольно быстро стало понятно, что необходимо рассматривать более сложные модели. В частности, для оценки шкалы высот по наблюдаемому отношению периодов фундаментальной моды и первого обертона изгибных колебаний корональных петель необходимо учесть изменение плотности вдоль магнитной трубки. Для использования наблюдений изгибных колебаниях в корональной сейсмологии важно построить модели как можно более полно описывающие реальные магнитные трубки в солнечной атмосфере. Затем необходимо исследовать какие параметры трубок являются существенными в сейсмологии. В частности, необходимо исследовать важность следующих параметров магнитных трубок:

- форма трубки;
- форма сечения трубки;
- закон изменения плотности вдоль трубки и в поперечном направлении;
- закрученность магнитных линий;
- кручение оси трубки, связанное с тем, что она не лежит в одной плоскости и является трёхмерной;
- наличие течения внутри трубки;
- влияние нелинейности.

Таким образом, задача об изгибных колебаниях магнитной трубки оказывается крайне важной для солнечной физики. Она также оказалась весьма сложной с точки зрения прикладной математики, так что её полное решение требует больших усилий теоретиков.

Содержание работы

Типичные периоды рассматриваемых волн и колебаний равны нескольким минутам, в то время как время свободного пробега протонов в корональных магнитных петлях порядка нескольких секунд, а время свободного пробега протонов в хромосфере и фотосфере много меньше секунды. Таким образом, для описания рассматриваемых в диссертации волн и колебаний можно использовать уравнения магнитной гидродинамики (МГД). Для рассматриваемых волн и колебаний и типичных условий в солнечной атмосфере вязкое и магнитное числа Рейнольдса очень велики, что позволяет использовать уравнения идеальной МГД. Единственным исключением является исследование затухания волн и колебаний вследствие резонансного поглощения, где диссипация учитывается в непосредственной окрестности резонансной поверхности для устранения сингулярности. Наконец, во всей диссертации использовались линейаризованные МГД уравнения. Единственным исключением является глава где исследовано влияние нелинейности на резонансное затухание распространяющихся изгибных колебаний.

Диссертация содержит три части. Первая часть носит вводный характер. В ней представлен краткий обзор наблюдений магнитных структур, а также наблюдений распространяющихся и стоячих волн в солнечной атмосфере полученных, в частности, на борту TRACE, Hinode и SOHO. Обсуждается использование наблюдений волн и колебаний в корональной сейсмологии. Представлены МГД уравнения используемые в диссертации. Кратко излагается теория МГД волн в однородных магнитных трубках.

Во второй части диссертации рассматриваются распространяющиеся изгибные волны в магнитных трубках. Эта часть содержит 5 глав. Первая глава является вводной. В ней кратко описаны наблюдения распространяющихся волн по магнитным трубкам в солнечной атмосфере. Во второй главе выводится уравнение описывающее изгибные волны в тонкой прямой магнитной трубке с плотностью и радиусом поперечного сечения меняющимися вдоль трубки. Это уравнение является волновым уравнением для переменной равной поперечному смещению трубки делённому на радиус поперечного сечения. В третьей главе уравнение описывающее изгибные волны в магнитной трубке с переменным радиусом сечения используется для исследования безотражательного распространения волн. Показано, что волновое уравнение сводится к уравнению Клейна-Гордона с постоянными коэффициентами в том случае когда фазовая скорость является линейной или квадратичной функцией координаты измеряемой вдоль трубки. Уравнения Клейна-Гордона затем используется для определения параметров безотражательно распространяющихся изгибных волн. В четвёртой главе исследуется пространственное затухание распространяющихся волн за счёт резонансного поглощения волновой энергии в тонком переходном слое между плотной плазмой внутри магнитной трубки и окружающей разреженной плазмой. В пятой главе исследуется влияние нелинейности на резонансное затухание распространяющихся волн. Показано, что главным нелинейным процессом является резонансное взаимодействие изгибной волны с желобковыми волновыми модами. Периоды этих мод являются кратными периоду изгибной волны. Декремент резонансного затухания обратно пропорционален периоду волны, поэтому желобковые моды затухают существенно быстрее изгибной волны. В результате нелинейного взаимодействия энергия изгибной волны перекачивается в быстро затухающие желобковые моды. Этот процесс приводит к весьма существенному ускорению резонансного затухания нелинейной изгибной волны.

Третья часть диссертации посвящена исследованию стоячих изгибных волн в магнитных трубках. Эта часть содержит 12 глав. В первой главе кратко описаны

наблюдения изгибных колебаний магнитных трубок в солнечной атмосфере. В основном эти наблюдения касаются затухающих изгибных колебаний корональных магнитных петель. Во второй главе рассматриваются колебания магнитных трубок с плотностью и радиусом поперечного сечения меняющимися вдоль трубки. Обсуждается использование этих результатов в корональной сейсмологии для получения оценки шкалы высот в солнечной короне. В третьей главе исследуется влияние формы поперечного сечения трубки на изгибные и желобковые волновые моды. Для этого рассматривается магнитная трубка с эллиптическим сечением. Показано, что в этом случае имеются две изгибные моды с различными частотами, одна поляризованная в направлении большой оси, а другая в направлении малой. То же верно для желобковых мод. В четвертой главе рассматриваются колебания скрученной магнитной трубки. В невозмущенном состоянии азимутальная компонента магнитного поля пропорциональна расстоянию от оси трубки внутри трубки и отсутствует вне трубки. Показано, что в длинноволновом приближении скрученность трубки не влияет на частоту изгибной моды, однако вызывает существенное увеличение частот желобковых мод. В пятой главе исследуются изгибные колебания неплоских магнитных трубок. Оси таких трубок имеют не только кривизну, но и кручение. Основным результатом этой главы связан с направлением поляризации колебаний. В частности, в случае линейно поляризованных колебаний направление поляризации изменяется вдоль трубки таким образом, что угол между этим направлением и главной нормалью к оси трубки остаётся постоянным. Результаты этой главы используются для интерпретации наблюдений поперечных колебаний неплоских корональных магнитных петель. В шестой главе изучаются колебания системы двух тонких параллельных магнитных трубок. Показано, что имеются две моды с разными частотами. Результаты используются в корональной сейсмологии для получения оценки шкалы высот в короне.

В седьмой главе рассматриваются изгибные колебания магнитных трубок в присутствии течения. Показано, что для наблюдаемых скоростей влияние течения как на частоту фундаментальной моды, так и на отношение частот первого обертона и фундаментальной моды мало. Таким образом, присутствие течения можно не учитывать при получении оценки шкалы высот в короне. В восьмой главе исследуется резонансное затухание изгибных колебаний магнитных трубок. Решена начальная задача описывающая изгибные колебания магнитной трубки вызванные начальным возмущением. Показано, что после переходного процесса с длительностью порядка одного периода колебание трубки достаточно хорошо описывается нормальной модой вдали от резонансной поверхности. Получена простая формула для декремента резонансного затухания и предложен метод определения внутренней структуры корональных магнитных петель на основе наблюдаемого затухания из поперечных колебаний. В настоящее время этот метод широко используется в корональной сейсмологии. В девятой главе изучается влияние изменения плотности вдоль трубки на резонансное затухание её поперечных колебаний. Основным результатом является следующий. В предположении однородной стратификации, означаемом что отношение плотности в переходном слое и вне трубки к плотности внутри трубки не меняется вдоль трубки, отношение времени затухания к периоду волны остаётся таким же как и в трубке с плотностью не меняющейся вдоль неё. Этот результат позволяет использовать наблюдаемое затухание колебаний для определения поперечной структуры корональных магнитных петель не имея информации о законе изменения плотности вдоль петли. В десятой главе рассматривается резонансное затухание поперечных колебаний системы состоящей из двух параллельных магнитных трубок. Показано, что мода с меньшей частотой затухает медленнее, чем мода с более высокой частотой. Кроме того, декремент является убывающей функцией расстояния между трубками. Таким образом, взаимодействие трубок замедляет резонансное затухание изгибных колебаний.

В одиннадцатой главе исследуются поперечные колебания остывающих корональных петель. Основным результатом является вывод выражения для адиабатического инварианта определяющего изменение амплитуды колебаний со

временем в том случае, когда характерное время изменения температуры петли велико. Показано, что охлаждение петли приводит к увеличению амплитуды колебаний. В двенадцатой главе обсуждается справедливость использования классической теории резонансного затухания для интерпретации затухания поперечных колебаний корональных петель. Дело в том, что в классической теории резонансного затухания предполагается, что затухающее колебание описывается нормальной модой диссипативной МГД. Однако это предположение верно только вдали от резонансной поверхности. Вблизи резонансной поверхности поведение смещения плазмы и возмущения магнитного поля в колеблющейся петле, по-видимому, коренным образом отличается от поведения этих величин в нормальной моде, где оно характеризуется очень малыми поперечными масштабами. Для формирования таких масштабов требуется время во много раз большее, чем наблюдаемое время затухания колебаний корональных петель. Для того чтобы прояснить ситуацию, была аналитически и численно решена начальная задача. Показано, что в течение примерно двух периодов, амплитуда колебаний не затухает экспоненциально, как предсказывает классическая теория. Вместо этого её эволюция во времени описывается гауссовской кривой. Затем амплитуда убывает экспоненциально в полном соответствии с классической теорией. В результате оказывается, что классическая теория недооценивает время затухания. Однако, для типичных параметров корональных петель, ошибка не превышает 20%. Таким образом, классическая теория даёт достаточно хорошую оценку времени затухания которая может быть использована в корональной сейсмологии.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Научные результаты, представленные в диссертации, были получены автором лично, или при его непосредственном участии. Результаты, которые вошли в данную диссертацию, опубликованы в 30 статьях в ведущих рецензируемых журналах. Все основные результаты диссертации опубликованы в журналах из перечня ВАК. Вклад автора во все рассмотренные в диссертации задачи является основным. Автором осуществлялись: физические и математические постановки всех задач, вошедших в диссертационную работу; разработка оригинальных асимптотических методов решения задач связанных с изгибными колебаниями магнитных трубок и с их затуханием вследствие резонансного поглощения; приложение полученных результатов к интерпретации наблюдательных данных; подготовка текстов публикаций, а также переписка с редакциями журналов и рецензентами.

Научная новизна результатов исследования

Научная новизна работы заключается в том, что впервые была разработана систематическая асимптотическая теория изгибных колебаний магнитных трубок. Эта теория использована для исследования зависимости характеристик распространяющихся и стоячих изгибных волн от параметров невозмущённого состояния и начальных условий. Результаты исследования применяются к корональной сейсмологии. Впервые изучена зависимость результатов корональной сейсмологии от предположений, сделанных относительно параметров осциллирующих структур.

Практическая значимость и ценность исследования

Практическая ценность диссертации состоит в том, что используя асимптотические методы, удалось создать достаточно полную теорию изгибных колебаний магнитных трубок в солнечной атмосфере. Эта теория может быть использована при интерпретации наблюдательных данных полученных на космических аппаратах. Она также может быть использована для определения стратегии наблюдений, поскольку позволяет определить

параметры изгибных колебаний, которые наиболее важны для корональной сейсмологии. Наконец, результаты диссертации могут быть использованы для интерпретации наблюдений волн и колебаний в атмосферах звезд.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Выведено уравнение описывающее изгибные волны в тонкой магнитной трубке с плотностью и радиусом поперечного сечения изменяющимися вдоль трубки.
2. Получено уравнение описывающее распространение нелинейных изгибных волн по тонкой магнитной трубке. С помощью этого уравнения показано, что нелинейность может существенно ускорять резонансное затухание распространяющихся изгибных волн.
3. Исследовано влияние расширения корональной магнитной петли на определение шкалы высот по отношению периодов фундаментальной моды и первого обертона изгибных колебаний корональной петли.
4. Впервые исследованы изгибные колебания магнитных трубок с эллиптическим сечением. Показано, что в этом случае имеется две фундаментальные моды изгибных колебаний: одна поляризованная вдоль большой оси эллиптического сечения и другая вдоль малой оси. Этот результат верен также для каждой желобковой моды.
5. Впервые аналитически исследованы изгибные колебания двух параллельных магнитных трубок. Получены выражения для частот и декрементов резонансного затухания.
6. Впервые была исследована эволюция амплитуды вследствие охлаждения петли. Получено выражение для адиабатического инварианта, сохраняющегося во время эволюции колебания при условии, что характерное время затухания волны много больше периода колебаний. Показано, что охлаждение петли вызывает увеличение амплитуды колебаний.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Достоверность результатов, представленных в диссертации, базируется на использовании общепризнанных моделей физических явлений, методов и подходов магнитной гидродинамики. Правильность выбранных теоретических подходов также подтверждается и тем, что ряд полученных в работе результатов хорошо согласуется с наблюдательными данными, полученными на различных космических аппаратах. Основные результаты диссертации опубликованы 30 статьях в ведущих мировых журналах, индексируемых в Web of Science. Все работы опубликованы в журналах индексируемых в Web of Science и имеющих высокие импакт факторы (Space Science Review - 6.283, Astrophysical Journal 5.993, Astronomy and Astrophysics 4.378, Solar Physics 4.039 и т.д.)

Список основных публикаций

1. Dymova M., Ruderman M. S., Non-axisymmetric oscillations of thin prominence fibrils // Solar Phys. - 2005 - V. 229, P. 79-94.
2. Dymova M., Ruderman M. S., Resonantly damped oscillations of longitudinally stratified coronal loops // Astron. Astrophys. – 2006a – V. 457, P. 1059-1070.

3. Dymova M., Ruderman M. S., The geometry effect on transverse oscillations of coronal loops // *Astron. Astrophys.* – 2006b – V. 459, P. 241-244.
4. Goossens M., Ruderman M. S., Conservation laws and connection formulae for resonant MHD waves // *Phys. Scripta* – 1995 – V. 60, P. 171-184.
5. Goossens M., Ruderman M. S., Hollweg J. V., Dissipative MHD solutions for resonant Alfvén waves in 1-dimensional magnetic tubes // *Solar Phys.* – 1995 – V. 157, P. 75-102.
6. Goossens M., Erdelyi R., Ruderman, M. S., Resonant MHD waves in the solar atmosphere // *Space Sci. Rev.* – 2011 – V. 158, P. 289-338.
7. Hood A. W., Ruderman M., Pascoe D. J., De Mortel I., Terradas J., Wright A. N., Damping of kink waves by mode coupling // *Astron. Astrophys.* – 2013 – V. 551, A39.
8. Robertson D., Ruderman M. S., Taroyan Y., The effect of density stratification on the transverse oscillations of two parallel coronal loops // *Astron. Astrophys.* – 2010 – V. 515, A33.
9. Robertson D., Ruderman M. S., Resonantly damped oscillations of two coronal loops // *Astron. Astrophys.* – 2011 – V. 525, A4.
10. Ruderman M. S., Long nonlinear non-axisymmetric wave propagation in a magnetic tube // *Phys. Plasmas* – 1992a – V. 47, P. 175-191.
11. Ruderman M. S., Nonlinear dissipation of surface Alfvén waves in the solar corona // *Astrophys. J.* – 1992b – V. 339, P. 724-732.
12. Ruderman M. S., Coronal heating by torsional Alfvén waves directly driven by footpoint motions: Harmonic driving versus stochastic driving // *Astrophys. J.* – 1999 – V. 521, P. 851-858.
13. Ruderman M. S., The resonant damping of oscillations of coronal loops with elliptic cross-sections // *Astron. Astrophys.* – 2003 – V. 409, P. 287-297.
14. Ruderman M. S., Non-axisymmetric oscillations of thin twisted magnetic tubes // *Solar Phys.* - 2007 - V. 246, P. 119–131.
15. Ruderman M. S., On the vertical and horizontal transverse oscillations of curved coronal loops // *Astron. Astrophys.* - 2009 - V. 506, P. 885-893.
16. Ruderman M. S., The effect of flow on transverse oscillations of coronal loops // *Solar Phys.* - 2010 - V. 267, P. 41–54.
17. Ruderman M.S., Transverse oscillations of coronal loops with slowly changing density // *Solar Phys.* - 2011a - V. 271, P. 377–391.
18. Ruderman M. S., Resonant damping of kink oscillations of cooling coronal magnetic loops // *Astron. Astrophys.* - 2011b - V. 534, A78.
19. Ruderman M. S., Goossens M., Nonlinearity effect on resonant absorption of surface Alfvén waves in incompressible plasmas // *Solar Phys.* - 1993 - V. 143, P. 69-88.
20. Ruderman M. S., Erdelyi, R. Transverse oscillations of coronal loops // *Space Sci. Rev.* - 2009 - V. 149, P. 199-228.
21. Ruderman M. S., Roberts B., The damping of coronal loop oscillations // *Astrophys. J.* - 2002 - V. 577, P. 475–486.
22. Ruderman M. S., Scott A., Transverse oscillations of non-planar coronal loops // *Astron.*

- Astrophys. - 2011 - V. 529, A33.
23. Ruderman M. S., Terradas J., Damping of coronal loop kink oscillations due to mode conversion // Astron. Astrophys. - 2013 - V. 555, A9.
 24. Ruderman M. S., Wright A. N., Nonstationary driven oscillations of a magnetic cavity // Phys. Plasmas - 2000 - V. 7, P. 3515-3530.
 25. Ruderman M. S., Goossens M., Andries J., Nonlinear propagating kink waves in thin magnetic tubes // Phys. Plasmas - 2010 - V. 17, 082108.
 26. Ruderman M. S., Oliver R., Erdelyi R., Ballester J. L., Goossens M., Slow surface wave damping in plasmas with anisotropic viscosity and thermal conductivity // Astron. Astrophys. - 2000 - V. 354, P. 261–276.
 27. Ruderman M. S., Pelinovsky E., Petrukhin N. S., Talipova T., Non-reflective propagation of kink waves in coronal magnetic loops // Solar Phys. - 2013 - V. 286, P. 417-426.
 28. Ruderman M. S., Tirry W., Goossens M., Non-stationary resonant Alfvén surface waves in one-dimensional magnetic plasmas // J. Plasma Phys. - 1995 - V. 54, P. 129-148.
 29. Ruderman M. S., Verth G., Erdelyi R., Transverse oscillations of longitudinally stratified coronal loops with variable cross-section // Astrophys. J. - 2008 - V. 686, P. 694-700.
 30. Van Doorselaere T., Ruderman M. S., Robertson D., Transverse oscillations of two parallel coronal loops // Astron. Astrophys. - 2008 - V. 485, P. 849–857.

Другие публикации автора

Имеется ещё более 100 публикаций в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Web of Science.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 01.03.03 – «физика Солнца» и паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 01.03.03 – «физика Солнца» и паспорте специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

ВЫВОД

Из вышеизложенного следует, что в диссертации Рудермана Михаила Соломоновича представлены новые научные результаты в рамках актуальной и современной темы физики Солнца. Тематика исследований соответствует специальностям 01.03.03 – «физика Солнца» и 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационной работе на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Изгибные волны и колебания в магнитных трубках в солнечной атмосфере» Рудермана Михаила Соломоновича рекомендуется к защите по специальностям 01.03.03 – «физика Солнца» и 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Зав. отделом 53 ИКИ РАН
д.ф.-м.н.



Кораблёв О. И.