

**КОМБИНИРОВАННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ
РЭЛЕЯ–ТЕЙЛОРА–КЕЛЬВИНА–ГЕЛЬМГОЛЬЦА
НА МАГНИТОПАУЗЕ**

¹А.В. Гульельми, ²А.С. Потапов, ³Б.И. Клайн

**RAYLEIGH–TAYLOR–KELVIN–HELMHOLTZ COMBINED INSTABILITY
AT THE MAGNETOPAUSE**

¹A.V. Guglielmi, ²A.S. Potapov, ³B.I. Klain

Магнитопауза отделяет геомагнитное поле от межпланетной плазмы и совершает финитные перемещения под воздействием переменного во времени напора солнечного ветра. Возникающие при этом ускорения приводят к тому, что на вполне определенной фазе движения возникает необходимое условие для развития неустойчивости Рэлея–Тейлора. Можно ожидать, что неустойчивость разовьется на фазе сжатия магнитосферы. Необходимо учитывать, что магнитопауза является тангенциальным разрывом. С одной стороны, течение плазмы вдоль магнитопаузы приводит к понижению порога неустойчивости Рэлея–Тейлора. С другой стороны, порог неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, типичной для тангенциального разрыва, также понижается на фазе сжатия магнитосферы. Таким образом, если говорить о магнитопаузе, то естественно и необходимо рассматривать оба типа неустойчивости совместно. В статье приведены основные сведения о комбинированной неустойчивости Рэлея–Тейлора–Кельвина–Гельмгольца, рассмотрено дисперсионное уравнение, определяющее эволюцию малых возмущений, и указаны возможные геофизические приложения теории (проникновение солнечной плазмы в магнитосферу, возбуждение глобальных колебаний Pc5 и т. п.).

The magnetopause separates the geomagnetic field from the interplanetary plasma and makes finite motions under the action of solar wind pressure varying in time. The resulting accelerations provide the necessary condition for developing Rayleigh–Taylor instability at well defined phase of motion. The instability would be expected to develop at the magnetosphere compression phase. It should be taken into account that the magnetopause is a tangential discontinuity. On the one hand, a plasma flow along the magnetopause causes a decrease in Rayleigh–Taylor instability threshold. On the other hand, the threshold of Kelvin–Helmholtz instability which is typical of the tangential discontinuity also decreases at the magnetosphere compression phase. Thus, we should jointly take into account both types of instabilities where the magnetosphere is concerned. The study presents basic information on combined Rayleigh–Taylor–Kelvin–Helmholtz instability. The dispersion equation determining the evolution of small perturbations is given, and possible geophysical applications of the theory are pointed out (solar plasma penetration into the magnetosphere, excitation of Pc5 global oscillations, etc.).

1. Введение

Теорию устойчивости границы раздела между тяжелой и легкой жидкостями в поле тяжести предложил Рэлей в 1900 г., а в 1950 г. Тейлор высказал идею о том, что роль силы тяжести может играть сила инерции, если жидкости движутся с ускорением, направленным перпендикулярно границе раздела (см. например [Утробин, 2004]). Вскоре после этого Бартель и Сол использовали идею о локальной эквивалентности гравитации и ускорения для исследования устойчивости магнитопаузы [Barthel, Sowle, 1964]. Как известно, магнитопауза отделяет геомагнитное поле от межпланетной плазмы и совершает финитные перемещения под воздействием переменного во времени напора солнечного ветра. Любое финитное движение сопровождается переменным ускорением, так что на определенной фазе движения обязательно возникнет необходимое условие для развития неустойчивости Рэлея–Тейлора. Можно ожидать, что неустойчивость разовьется на фазе сжатия магнитосферы, поскольку плотность плазмы снаружи магнитопаузы обычно больше, чем внутри. В 1973 г. Клайн и Потапов обратили внимание на то, что магнитопауза является не контактным разрывом, как считали Бартель и Сол, а тангенциальным. Важным следствием этого является понижение порога неустойчивости Рэлея–Тейлора [Клайн, Потапов, 1973]. В то же время порог неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, типичной для тангенциального разрыва, также понижается на фазе сжатия магнитосферы при финитных движениях магнитопаузы. Та-

ким образом, если говорить о магнитопаузе, то естественно и даже необходимо рассматривать неустойчивости Рэлея–Тейлора и Кельвина–Гельмгольца совместно.

Теперь обратим внимание на интересное положение, сложившееся в геофизической литературе по вопросу об устойчивости магнитопаузы. После известных работ Данжи [Dungey, 1955] неустойчивость Кельвина–Гельмгольца широко обсуждается, главным образом в связи с проблемой вынужденных МГД-колебаний магнитосферы в диапазонах Pc4 (45–150 с) и Pc5 (150–600 с). Ей посвящено огромное количество статей (см. списки литературы в обзорах [Troitskaya, Guglielmi, 1967; Hasegawa, Chen, 1974; Southwood, 1974] и монографиях [Гульельми, Троицкая, 1973; Нишида, 1980; Guglielmi, Pokhotelov, 1996]). В отличие от этого, литература по неустойчивости Рэлея–Тейлора бедна. Неустойчивости этого типа не уделялось достаточного внимания. Кроме указанных выше двух статей [Barthel, Sowle, 1964; Клайн, Потапов, 1973] внимания заслуживает статья [Mishin, 1993], и этим практически исчерпывается список известных нам работ. Но такое положение ничем не оправдано. Во-первых, как на это указал еще Чандрасекар [Chandrasekhar, 1961], оба типа неустойчивостей целесообразно рассматривать совместно. Во-вторых, астрофизика дает нам пример искусного использования представлений о неустойчивости Рэлея–Тейлора для анализа широкого круга явлений [Пикельнер, 1961], например, для интерпретации перемешивания вещества при замед-

ленном расширении остатка материи после вспышки сверхновой. В физике магнитосферы неустойчивостью Рэля–Тейлора можно было бы объяснить, по крайней мере частично, спорадическое проникновение солнечной плазмы в магнитосферу Земли. Далее, комбинированная неустойчивость Рэля–Тейлора–Кельвина–Гельмгольца, по-видимому, играет роль в возбуждении так называемых глобальных Pc5 [Ротаров, et al., 2006; Потапов и др., 2008], наблюдающихся при погружении магнитосферы Земли в высокоскоростной поток солнечной плазмы. Всеми этими соображениями и мотивировано написание данной статьи. В следующем разделе мы напомним основные свойства комбинированной неустойчивости, а в разделе 3 обсудим возможные геофизические приложения теории.

2. Комбинированная неустойчивость

Дисперсионное уравнение, определяющее эволюцию малых возмущений при комбинированной неустойчивости Рэля–Тейлора–Кельвина–Гельмгольца, имеет следующий вид [Клайн, Потапов, 1973]:

$$4\pi[(\rho_1 - \rho_2)g|\mathbf{k}| + (\omega - \mathbf{k}\mathbf{v}_1)^2 \rho_1 + (\omega - \mathbf{k}\mathbf{v}_2)^2 \rho_2] = (\mathbf{k}\mathbf{B}_1)^2 + (\mathbf{k}\mathbf{B}_2)^2. \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность плазмы, g – гравитационное ускорение, \mathbf{k} – волновой вектор, ω – частота, \mathbf{v} – скорость течения плазмы, \mathbf{B} – магнитное поле. Индекс 1 относится к соответствующим величинам по одну, а индекс 2 – по другую сторону от тангенциального разрыва. Разрыв предполагается плоским. Векторы \mathbf{k} , \mathbf{v} и \mathbf{B} параллельны, а эффективное поле тяжести перпендикулярно плоскости разрыва. Плазма рассматривается как несжимаемая жидкость (об учете сжимаемости см. ниже). В дальнейшем будем считать, что $\rho_1 \geq \rho_2$, если говорить о магнитопаузе, то ρ_1 будет обозначать плотность с внешней, а ρ_2 – с внутренней стороны магнитопаузы. Соответственно число Атвуда $A = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)$ будет изменяться в интервале от 0 до 1. Положительным значениям g в (1) соответствует направление к Земле эффективной силы тяжести, которая имитирует действие силы инерции в системе отсчета, связанной с магнитопаузой.

Положим $\mathbf{v}_2 = 0$, $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}$, что соответствует обтеканию магнитосферы солнечной плазмой, текущей вдоль магнитопаузы со скоростью \mathbf{v} . Тогда корни дисперсионного уравнения (1) можно записать в виде

$$\omega_{\pm} = C\mathbf{k}\mathbf{v} \pm \left\{ D[(\mathbf{k}\mathbf{B}_1)^2 + (\mathbf{k}\mathbf{B}_2)^2] - E(\mathbf{k}\mathbf{v})^2 - A|\mathbf{k}|g \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$C = \rho_1 / (\rho_1 + \rho_2),$$

$$D = [4\pi(\rho_1 + \rho_2)]^{-1},$$

$$E = \rho_1 \rho_2 / (\rho_1 + \rho_2)^2.$$

Условием неустойчивости, очевидно, является следующее неравенство:

$$D[(\mathbf{k}\mathbf{B}_1)^2 + (\mathbf{k}\mathbf{B}_2)^2] < A|\mathbf{k}|g + E(\mathbf{k}\mathbf{v})^2. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при $Ag > 0$ ($Ag < 0$), т. е. на фазе сжатия (расширения) магнитосферы, порог неустойчивости Кельвина–Гельмгольца понижается (повышается) при ненулевом числе Атвуда. Из (3) следует также, что при $Ag > 0$ течение плазмы вдоль разрыва понижает порог неустойчивости Рэля–Тейлора. (Понятно, что при $Ag < 0$ о неустойчивости Рэля–Тейлора говорить не приходится.)

Допустим, условие (3) соблюдается. Рассмотрим простую конфигурацию модели, что позволит легко увидеть зависимость инкремента малых возмущений $\text{Im } \omega$ от параметров задачи. Пусть $\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \mathbf{B}$ и векторы \mathbf{B} , \mathbf{k} и \mathbf{v} параллельны друг другу. Введем обозначение $c_A = B / \sqrt{2\pi(\rho_1 + \rho_2)}$ и будем измерять $\text{Im } \omega$, k и v в единицах Ag/c_A , Ag/c_A^2 и c_A соответственно. Тогда зависимость $\text{Im } \omega$ от k и v будет иметь вид

$$\text{Im } \omega = \sqrt{k + k^2(v^2 - 1)}, \quad (4)$$

показанный на рис. 1. Нетрудно заметить, что при всех ненулевых значениях v течение плазмы вдоль поверхности повышает инкремент неустойчивости Рэля–Тейлора. В гидродинамике несжимаемой жидкости на это впервые обратил внимание Чандрасекар [Chandrasekhar, 1961], а в магнитной гидродинамике (с учетом сжимаемости) данное свойство было отмечено в работе [Клайн, Потапов, 1973] при анализе устойчивости магнитопаузы. Если течение отсутствует ($v=0$) и нет магнитного поля ($B=0$), то при $Ag > 0$ инкремент неустойчивости определяется классической формулой $\text{Im } \omega = \sqrt{Agk}$. Интересно отметить, что этой же формулой определяется инкремент при ненулевых значениях v и B в случае, когда $v=c_A$ (этому соответствует кривая $\text{Im } \omega(k, v=1)$ на рис. 1).

Уравнение (1) выведено при условии несжимаемости плазмы. Учет сжимаемости сильно усложняет задачу. Он приводит к довольно громоздкому дисперсионному уравнению, содержащему гипергеомет-

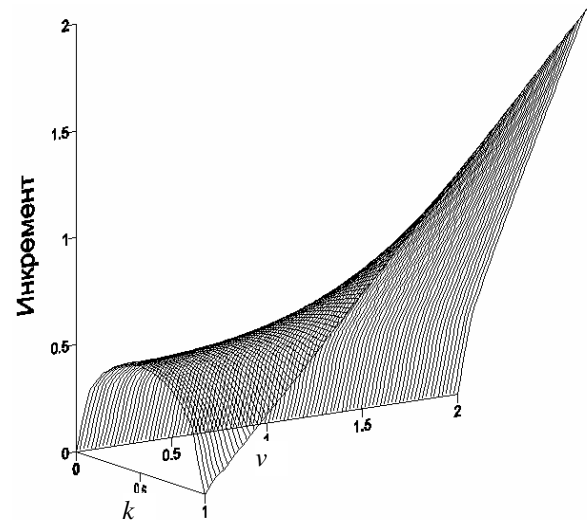


Рис. 1. Зависимость инкремента комбинированной неустойчивости $\text{Im } \omega$ от скорости v и волнового числа k .

рические функции Куммера [Клайн, Потапов, 1973]. Поэтому приближение несжимаемой плазмы оправдано до известной степени при попытке разобраться в качественной картине явления. Иногда высказывают мнение, что плазму можно считать несжимаемой «при рассмотрении движений со скоростями, много меньшими скорости звука» (см. [Арцимович, Сагдеев, 1979]). С этим, однако, нельзя согласиться. Сжимаемость необходимо учитывать в обязательном порядке, если только длина волны возмущения не мала по сравнению со шкалами высот. Данное условие имеет геометрический, а не динамический смысл. Другими словами, вопреки указанному мнению, сжимаемость может оказаться существенной при сколь угодно малых скоростях движения.

3. Обсуждение

При более строгом рассмотрении желательно, вообще говоря, помимо учета сжимаемости плазмы принять во внимание кривизну поверхности раздела сред, неоднородность распределения параметров вдоль нее и другие свойства реальной магнитопаузы. Эти свойства, безусловно, влияют на эволюцию малых возмущений поверхности. Например, при положительных числах Атвуда кривизна может подавить неустойчивость Рэлея–Тейлора. Вопросы такого рода заслуживают внимания, поскольку «всякая идеализация рано или поздно мстит за себя» [Горелик, 2008], но мы не будем останавливаться на этом, а обсудим не менее интересный вопрос о возможных приложениях теории.

Из многообразия актуальных и часто обсуждаемых проблем солнечно-земной физики мы выделим две, а именно проблему проникновения плазмы солнечного ветра в магнитосферу Земли и проблему возбуждения крупномасштабных колебаний магнитосферы типа Pc5 (диапазон периодов $T=150\text{--}500$ с). Сами по себе они не связаны тесно друг с другом, однако совместное рассмотрение этих двух проблем в рамках теории комбинированной неустойчивости Рэлея–Тейлора–Кельвина–Гельмгольца позволяет внести некоторую ясность в каждую из них.

Спорадическое проникновение в магнитосферу солнечной плазмы в форме так называемых РТЕ (Plasma Transfer Events) изучено по данным измерений на спутниках «Cluster» и подробно описано (см. например [Lundin, et al., 2003], а также литературу, указанную в обзоре [Lundin, Guglielmi, 2006]). Особенно важным свойством РТЕ является то, что эти события могут происходить при северной ориентации межпланетного магнитного поля, когда, по видимому, нет пересоединения между силовыми линиями геомагнитного и межпланетного магнитного полей. С теоретической и с экспериментальной точек зрения полезно исследовать вопрос о возможной связи РТЕ с ускорениями магнитопаузы. Здесь нас ожидают интересные результаты. Идея состоит в том, что РТЕ возникает по аналогии с тем, как тяжелая жидкость проникает в легкую под воздействием гравитации или ускорения в результате неустойчивости Рэлея–Тейлора. Более плотная плазма проникает из переходного слоя перед магнитопаузой в менее плотную плазму за магнитопаузой и продвигается по направлению к Земле, если эффективная сила тяжести действует в том же направле-

нии. Роль неустойчивости Рэлея–Тейлора в механизме РТЕ можно выявить экспериментально путем корреляционного анализа связи РТЕ с фазой колебаний магнитопаузы. Теория определенно предсказывает, во-первых, более вероятное появление РТЕ на фазе сжатия магнитосферы, чем на фазе расширения, и, во-вторых, то, что появление РТЕ следует ожидать чаще вдали от подсолнечной точки, чем в ее непосредственной близости, поскольку порог неустойчивости Рэлея–Тейлора понижается, а инкремент повышается с возрастанием скорости течения.

Таким образом, намечается связь проблемы РТЕ с проблемой возбуждения крупномасштабных колебаний магнитосферы типа Pc5. На рис. 2 приведен пример наблюдения на четырех обсерваториях (сверху вниз – Victoria, Hartland, Irkutsk и Memambetsu), почти равномерно распределенных вокруг Земли, и на геостационарной орбите так называемых глобальных Pc5 [Potapov, et al., 2006; Потапов, Полюшкина, 2008]. (Глобальность явления здесь проявляется в одновременном наблюдении колебаний на всех долготях). Они возбуждаются в магнитосфере при прохождении высокоскоростных потоков солнечного ветра и обладают рядом свойств, отличающих эти колебания от «классической» разновидности Pc5 [Potapov, et al., 2006]. Возбуждение классических Pc5 принято объяснять неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца [Hasegawa, Chen, 1974; Southwood, 1974; Нишида, 1980].

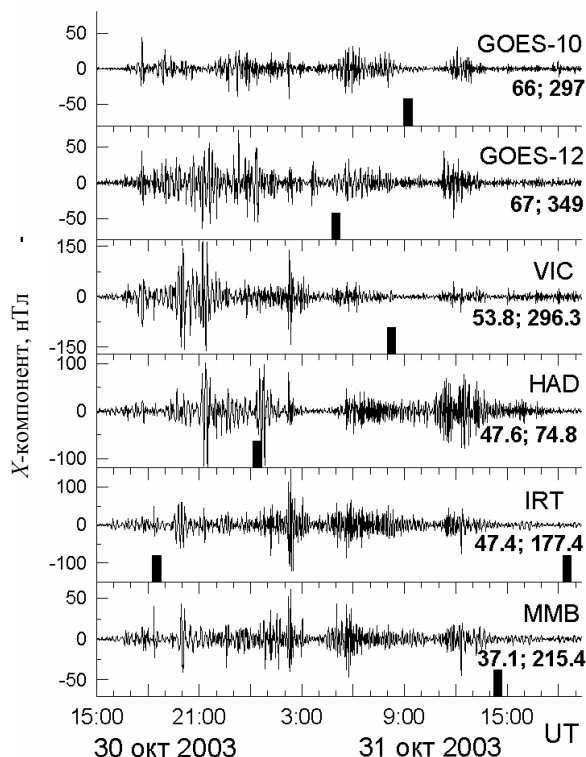


Рис. 2. Пример наблюдения глобальных геомагнитных пульсаций Pc5 на двух геостационарных спутниках GOES-1 и -2 и на четырех наземных станциях, распределенных вокруг земного шара. Под сокращенными названиями станций указаны их исправленные геомагнитные координаты. Для спутников приведены примерные координаты их проекций на Северное полушарие вдоль магнитной силовой линии. Черными прямоугольниками показано время местной полуночи для каждой станции [Potapov, et al., 2006].

Специфические свойства глобальных Pc5 естественно попытаться объяснить действием комбинированной неустойчивости Рэлея–Тейлора–Кельвина–Гельмгольца. В самом деле, при погружении магнитосферы в высокоскоростной поток наблюдаются весьма глубокие перепады динамического напора солнечной плазмы, приводящие к мощным ускорениям магнитопаузы. На фазе сжатия (расширения) магнитосферы ускорение приводит, как мы установили, к понижению (повышению) порога и повышению (понижению) инкремента неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Таким образом, теория приводит к вполне определенному предсказанию возможной связи между амплитудной модуляцией Pc5 и вариациями динамического напора солнечного ветра.

Однако при рассмотрении вопроса о модуляции Pc5 следует все же сделать одно уточнение. До сих пор в основе наших рассуждений лежала простая, но весьма продуктивная идея о замене гравитации силами инерции в теории Рэлея–Тейлора при анализе устойчивости магнитопаузы. Эта идея может иметь еще одно полезное применение. Речь идет о действии эффективного гравитационного поля не только на магнитопаузу, но и на так называемый низкоширотный пограничный слой (low latitude boundary layer), или сокращенно LLBL, примыкающий к магнитопаузе с внутренней стороны. Слой LLBL стратифицирован по плотности и по температуре, причем таким образом, что рост малых отклонений давления, плотности, скорости и магнитного поля от равновесных значений может возникнуть на фазе как сжатия, так и расширения магнитосферы. Хотя данный вопрос нуждается в отдельном исследовании, можно уверенно сказать, что неустойчивый при поступательно-возвратных перемещениях пограничный слой вполне может быть источником колебаний Pc5.

Но если даже окажется, что наложение эффективного гравитационного поля не приводит к неустойчивости пограничного слоя, в нем возникнут условия для распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ). Обнаружение с помощью спутников ВГВ на периферии магнитосферы само по себе было бы исключительно интересно с точки зрения солнечно-земной физики. Внутренние волны должны проявляться на поверхности Земли южнее проекции каспа (в Северном полушарии).

4. Заключение

При финитных движениях магнитопаузы возникает комбинированная неустойчивость Рэлея–Тейлора–Кельвина–Гельмгольца, играющая важную роль в ряде геофизических явлений. Она возникает в результате совместного действия обтекающего магнитосферу потока солнечной плазмы и вариаций динамического давления этого потока. Скачок скорости течения плазмы на магнитопаузе понижает порог неустойчивости Рэлея–Тейлора, а порог неустойчивости Кельвина–Гельмгольца повышается (повышается) на фазе сжатия (расширения) магнитосферы. Анализ наземных и спутниковых данных свидетельствует о том, что вопрос о комбинированной неустойчивости на магнитопаузе имеет глубокую связь с общими вопросами физики магнитосферы.

Выражаем благодарность Мишину Владимиру Виленовичу, который любезно обратил наше внимание на его статью, посвященную неустойчивости магнитопаузы. Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (07-05-00696, 09-05-00048 и 10-05-00661).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. 317 с.
- Горелик Г.С. Колебания и волны. М.: Физматлит, 2008. 655 с.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Клайн Б.И., Потапов А.С. Влияние финитных движений на неустойчивость тангенциальных разрывов в магнитосфере Земли // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1973. Вып. 27. С. 49–53.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Наука, 1980. 302 с.
- Пикельнер С.Б. Основы космической электродинамики. М.: Физматгиз, 1961. 295 с.
- Потапов А.С., Цэгмед Б., Полюшкина Т.Н. Вклад глобальных колебаний Pc5 в магнитную возмущенность во время геомагнитных бурь // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12, т. 1. С. 142–147.
- Потапов А.С., Полюшкина Т.Н. Глобальные колебания магнитосферы и их свойства // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 8: Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля / Отв. ред. Г.А. Жеребцов. М.: ИСЗФ СО РАН; ИФЗ РАН, 2008. С. 78–83.
- Утробин В.П. Рэлея–Тейлора неустойчивость // Астронет. 2004. <http://www.astronet.ru/db/msg/1188634>.
- Barthel J.R., Sowle D.H. A mechanism of injection of solar plasma into magnetosphere // Planet. Space Sci. 1964. V. 12, N 3. P. 209–217.
- Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford: Clarendon, 1961. 327 p.
- Dungey J.W. Electrodynamics of the outer atmosphere // Proceedings of the Ionosphere / The Physical Society of London. London, 1955. P. 225.
- Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Geoelectromagnetic Waves. IOP Publ. Ltd. Bristol and Philadelphia, 1996. 402 p.
- Hasegawa A., Chen L. Theory of magnetic pulsations // Space Sci. Rev. 1974. V. 16. P. 347.
- Lundin R., Sauvard J.A., Rème H., et al. Evidence for impulsive solar wind plasma penetration through the dayside magnetopause // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 457–472.
- Lundin R., Guglielmi A. Ponderomotive forces in Cosmos // Space Sci. Rev. 2006. V. 127, N 1–4. P. 1–116.
- Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin-Helmholtz instability // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, N A12. P. 21365–21371.
- Potapov A., Guglielmi A., Tsegmed B., Kultima J. Global Pc5 event during 29–31 October 2003 magnetic storm. // Adv. Space Res. 2006. V. 38, Iss. 8. P. 1582–1586.
- Southwood D.J. Recent studies in micropulsation theory // Space Sci. Rev. 1974. V. 16. P. 413.
- Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1967. V. 7, N 5/6. P. 689–769.

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

³Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, Ярославская обл.