

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИИ РАЗМЕРОВ АЭРОЗОЛЕЙ НА ДИССИПАТИВНУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕ ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР

В.С. Грач

THE INFLUENCE OF AEROSOL'S SIZE DISPERSION ON DISSIPATIVE INSTABILITY OF AEROSOL FLOW IN PLANETARY ATMOSPHERES' PLASMA

V.S. Grach

Исследуется диссипативная неустойчивость аэрозольного потока в холодной слабоионизированной столкновительной плазме. Неустойчивость порождается относительным движением аэрозольной и ионной компонент, вызванным гравитационным падением аэрозолей. Учитываются молекулярная ионная диффузия, зарядка крупных частиц и разброс их размеров для трех модельных распределений: монодисперсного ансамбля, степенного распределения и распределения Гаусса. Получены зависимости порогового значения заряда на аэрозолях, необходимого для развития неустойчивости, от параметров системы. Показано, что дисперсия размеров частиц значительно повышает пороговое значение заряда и качественно меняет зависимости от ряда параметров. Получены количественные оценки для мезосферы Земли (высоты 80–90 км), средней атмосферы Марса (70–110 км) и ионосферы Титана (900–1200 км).

Dissipative instability of aerosol flow in a cold weakly-ionized collisional plasma is studied. The following factors are considered: relative motion of the aerosol and ion components, caused by gravity, molecular ion diffusion, charging processes for aerosols and their size dispersion for three model distributions (monodispersed ensemble, power and Gaussian distributions). The dependences of the threshold particle charge, necessary for the instability to develop, on the system parameters are obtained. It is shown that the size dispersion greatly increases the threshold charge and changes its dependence on some of the parameters. Quantitative estimates are obtained for Earth's mesosphere (altitudes of 80–90 km), mean Martian atmosphere (70–110 km) and Titan's ionosphere (900–1200 km).

В настоящее время активно исследуются различные процессы в пылевой плазме как в лабораторных экспериментах, так и в естественных условиях [Комплексная и пылевая плазма..., 2012]. От обычной плазмы пылевая плазма отличается наличием крупных заряженных частиц субмикронного и микронного размера (пылевая, или аэрозольная компонента). Наличие пылевой компоненты приводит к появлению новых типов собственных волн в плазме, в частности пылезвуковой моды [Rao et al., 1990].

Теоретическая модель возникновения электрических структур в аэрозольной плазме вследствие развития диссипативной неустойчивости аэрозольного потока (по существу – неустойчивости «пылевого звука») была впервые предложена для грозовых облаков в [Трахтенгерц, 1989]; это исследование было продолжено в [Грач и др., 2005] с учетом разброса аэрозольных частиц по размерам. Для мезосферных условий диссипативная неустойчивость была впервые исследована в [Trakhtengerts, 1994] в рамках модели, предложенной в [Трахтенгерц, 1989], с учетом диффузии ионов и электронов. В мезосфере данная неустойчивость может генерировать неоднородности электронной концентрации, вызывающие летнее полярное мезосферное эхо [Rapp, Lubken, 2004]. В [Грач, 2009] характеристики диссипативной неустойчивости пылевого звука в мезосферных условиях были численно проанализированы при учете диффузии ионов и электронов и процессов зарядки аэрозолей.

В данной работе впервые исследовано влияние разброса размеров крупных частиц на характеристики диссипативной неустойчивости аэрозольного потока при одновременном учете процессов зарядки и ионной диффузии.

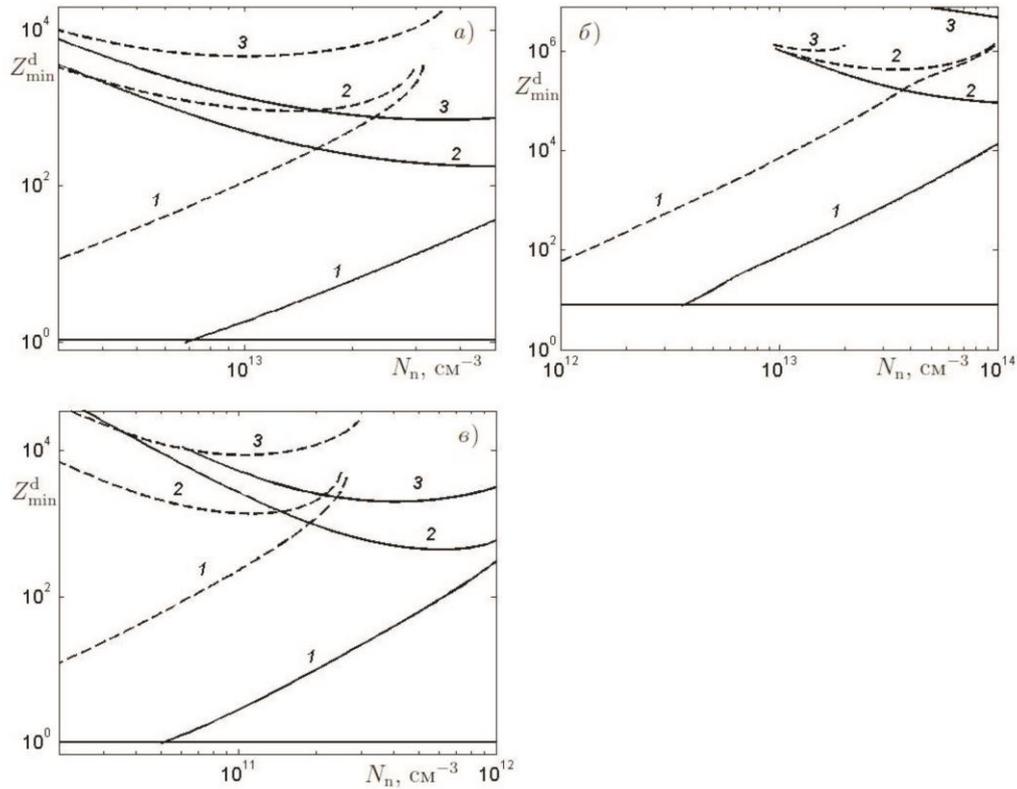
Рассматривается слабоионизированная столкновительная плазма, созданная сторонними источниками ионизации, которая содержит нейтральный газ, положительные ионы, электроны и крупные заряжен-

ные частицы (аэрозольная/пылевая компонента). Концентрация нейтрального газа значительно превышает концентрацию заряженных компонент. Ионную и электронную компоненты мы рассматриваем в гидродинамическом приближении.

Предполагается, что все пылевые частицы (аэрозоли) имеют сферическую форму, радиус каждой частицы равен R . Тепловой разброс скоростей частиц мы полагаем несущественным. Скорость относительного движения крупных частиц и нейтрального газа V определяется силой трения, и в рассматриваемых условиях разреженной среды $V \sim R^2$. Аэрозоли приобретают заряд вследствие оседания на них ионов и электронов; в данной работе мы используем зондовую модель зарядки. Движение ионов и электронов целиком определяется их тепловыми скоростями, также мы допускаем наличие в среде малой фракции высокоэнергичных электронов [Грач, 2009]. В этом случае аэрозоли заряжаются отрицательно, $|Q| \sim R$. Функция распределения частиц по размерам предполагается известной; мы рассматриваем три модельных распределения (монодисперсный ансамбль, распределение Гаусса и степенное распределение с показателем 4).

При описании аэрозолей мы учитываем процесс их зарядки, разброс размеров, силу тяжести, электростатическую силу и силу трения со стороны нейтрального газа. В описании ионной и электронной компоненты учитываются столкновения с нейтральным газом, электрическое поле и потери ионов и электронов при оседании на аэрозолях в процессе зарядки.

В рамках данных приближений в работе было получено дисперсионное уравнение, характеризующее свойства спектральной составляющей квазистатического электрического поля с волновым вектором k на частоте ω . На основе численного анализа дисперсионного уравнения были исследованы пороговые характеристики неустойчивости.



Характеристики порога неустойчивости в зависимости от параметров системы для условий Земли (а), Марса (б) и Титана (в). Кривые 1 соответствуют монодисперсному ансамблю, кривые 2 – распределению Гаусса ($\Delta=0.09$ для условий Земли и Титана, $\Delta=0.05$ для Марса), кривые 3 – степенному распределению. Горизонтальные линии соответствуют значению заряда, обеспеченного фоновыми электронами. Для штриховых кривых: $\rho_a=1 \text{ г/см}^3$, $\delta=n_i/n_e=10$, $v_i/N_n=7 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ (а), $\rho_a=1 \text{ г/см}^3$, $\delta=10$, $v_i/N_n=9 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ (б), $\rho_a=0.7 \text{ г/см}^3$, $\delta=10$, $v_i/N_n=7 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ (в), для сплошных кривых: $\rho_a=2 \text{ г/см}^3$, $\delta=50$, $v_i/N_n=21 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ (а), $\rho_a=2 \text{ г/см}^3$, $\delta=50$, $v_i/N_n=27 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ (б), $\rho_a=1.5 \text{ г/см}^3$, $\delta=10$, $v_i/N_n=21 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ (в).

Анализ проводился для трех плазмopodobных сред: мезосферы Земли (высоты $80 \div 90$ км, аэрозоли с радиусами $50 \div 500$ нм), средней атмосферы Марса (высоты $70 \div 100$ км, пылевые частицы с радиусами порядка 1 мкм) и ионосферы Титана (высоты $900 \div 1200$ км, аэрозоли с радиусами $20 \div 50$ нм).

Условие возбуждения неустойчивости может быть записано следующим образом:

$$Z_{\min} < Z < Z_{\max},$$

где Z – заряд аэрозоля с характерным радиусом a , Z_{\min} , Z_{\max} – решения дисперсионного уравнения для порога неустойчивости ($\text{Im}\omega=0$). Основным внешним параметром, определяющим заряд аэрозоля, является температура фоновых электронов или поток сверхтепловых электронов; пороговые значения Z_{\min} , Z_{\max} определяются в первую очередь ионной диффузией, относительной скоростью и разбросом аэрозолей по размерам.

В случае монодисперсного ансамбля $Z_{\min} \ll Z_{\max}$, поэтому критерием для развития неустойчивости можно считать выполнение неравенства $Z > Z_{\min}$. При наличии разброса размеров со степенной функцией распределения увеличивается интервал волновых чисел, в котором возможна неустойчивость, и повышаются оба пороговых значения Z_{\min} и Z_{\max} ; интервал между ними также увеличивается. Для гауссовой функции распределения пороговое значение

Z_{\min} увеличивается с учетом разброса, Z_{\max} понижается. С увеличением относительной дисперсии Δ^2 уменьшается интервал волновых чисел, при которых возможна неустойчивость, и, начиная с некоторого Δ^* , зависящего от параметров системы, неустойчивость отсутствует. Минимальное значение Z_{\min} достигается при меньших значениях k ; так же и в случае степенного распределения. При $\Delta < \Delta^*$ для ансамбля с гауссовой функцией распределения, как и для монодисперсного ансамбля и ансамбля со степенным спектром, справедливо соотношение $Z_{\min} \ll Z_{\max}$. Поскольку Z_{\min} во всех случаях достаточно велико, именно оно определяет возможность развития неустойчивости, а соответствующее ему волновое число k_{opt} – оптимальные масштабы возмущений, генерируемых при неустойчивости.

Зависимости Z_{\min} от параметров среды представлены на рисунке для всех рассматриваемых сред. Полученные результаты показывают, что наличие разброса размеров, независимо от функции распределения, приводит к значительному увеличению порогового значения и оптимального масштаба, а также к качественному изменению зависимостей от некоторых параметров среды.

Суммируем полученные зависимости от параметров системы. Пороговое значение заряда уменьшается с ростом массы ионов, увеличением отношения концентраций ионов и электронов $\delta=n_i/n_e$ и частоты

соударений ионов v_i . Значение заряда на 100 нм радиуса частицы (по существу, поток сверхтепловых электронов) имеет минимум в зависимости от радиуса; при учете разброса по радиусам этот минимум смещается в область меньших значений a . В отсутствие разброса Z_{\min} уменьшается с уменьшением концентрации нейтральных частиц N_n и увеличением плотности аэрозолей ρ_a (уменьшение концентрации, как и увеличение плотности, соответствует увеличению относительной скорости V), при учете разброса зависимости $Z_{\min}(N_n)$, $Z_{\min}(\rho_a)$ имеют минимум.

Наличие указанного минимума связано с тем, что влияние разброса сильнее проявляется при меньших концентрациях и больших средних радиусах аэрозолей, что соответствует большим скоростям V и меньшей диссипации при трении аэрозольных частиц с частицами нейтрального газа. Поскольку наличие разброса приводит к повышению порога, а увеличение относительной скорости в большинстве случаев – к его понижению (см. также [Грач, 2009]), совместное влияние этих факторов и дает минимум в зависимостях $Z_{\min}(V)$.

Повышение порогового заряда при учете разброса размеров наиболее значительно в рассматриваемой области атмосферы Марса (до нескольких порядков), наименее – в мезосфере Земли (в два-три раза). Количественно минимальные пороговые значения заряда, нормированного на 100 нм радиуса частицы, при учете разброса размеров в мезосфере Земли составляют порядка $(100 \div 300)e \cdot 100a$, в ионосфере Титана – $(900 \div 2400)e \cdot 100a$, в атмосфере Марса – $(700 \div 3 \cdot 10^6)e \cdot 100a$, здесь и далее a в нм. Для монодисперсного ансамбля минимальные пороговые значения составляют $(5 \div 10)e \cdot 100/a$ для условий Земли и $(1 \div 10)e \cdot 100/a$ для условий Титана и Марса. В условиях Марса и Титана в случае монодисперсного ансамбля пороговые заряды на достаточно больших высотах могут быть обеспечены фоновыми электронами.

Оптимальные масштабы неустойчивости наименьшие в мезосфере Земли ($60 < \lambda_{\text{opt}} [\text{см}] < 150$), наибольшие – в ионосфере Титана ($8 \cdot 10^4 < \lambda_{\text{opt}} [\text{см}] < 90 \cdot 10^4$). Также для ионосферы Титана характерно наибольшее повышение λ_{opt} при учете разброса размеров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-02-31863).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Грач В.С., Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю. Кинетическая неустойчивость потока заряженных частиц в грозовом облаке // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 6. С. 488–501.

Грач В.С. Диссипативные неустойчивости в мезосферной плазме с учетом эффектов зарядки аэрозольных частиц // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 12. С. 945–958.

Трахтенгерц В.Ю. О природе электрических ячеек в грозовом облаке // Доклады АН СССР. 1989. Т. 308, № 3. С. 584–586.

Rao N.N., Shukla P.K., Yu M.Y. Dust-acoustic waves in dusty plasmas // Plan. Space Sci. 1990. V. 8, N 4. P. 543–546.

Rapp M., Lubken F.-J. Polar mesosphere summer echoes (pmse): review of observations and current understanding // Atmos. Phys. Chem. Discuss. 2004. V. 4, N 12. P. 4777–4876.

Trakhtengerts V.Yu. The generation of electric field by aerosol particle flow in the middle atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1994. V. 56, N 3. P. 337–342.

Комплексная и пылевая плазма. Из лаборатории в космос / Под редакцией В.Е. Фортова, Г.Е. Морфилла. М.: Физматлит, 2012. 444 с.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия