

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПЫЛЕВЫЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ
В ЭКЗОСФЕРЕ МЕРКУРИЯ© 2023 г. Ю. Н. Извекова^{а,*}, С. И. Попель^а, А. П. Голубь^а^а Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: izvekova@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 23.06.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 20.07.2023 г.

Экзосфера Меркурия, имеющая много общего с экзосферой Луны, также может содержать взвешенные пылевые частицы, которые под действием интенсивного солнечного излучения приобретают положительные заряды и являются одной из составляющих плазменно-пылевой системы. Кроме пылевых частиц, над поверхностью планеты присутствуют фотоэлектроны, образованные в результате взаимодействия солнечного излучения с поверхностью планеты, а также с взвешенными пылевыми частицами. Меркурий, в отличие от Луны, имеет свою магнитосферу, что отражается на параметрах плазменно-пылевой системы. Параметры пылевой плазмы у поверхности Меркурия могут изменяться в зависимости от расстояния планеты до Солнца, которое заметно меняется при движении по вытянутой орбите, а также в зависимости от локализации рассматриваемой области на поверхности планеты. Так, вблизи магнитных полюсов солнечный ветер может достигать поверхности планеты, что необходимо учитывать при определении параметров плазмы. Вне магнитных полюсов влиянием солнечного ветра можно пренебречь. В пылевой плазме у поверхности Меркурия можно ожидать развития линейных и нелинейных волновых процессов. В данной работе рассматриваются нелинейные волны — пылевые звуковые солитоны и нелинейные периодические волны. Получены профили потенциала солитонов большой амплитуды и нелинейных периодических волн, получены зависимости амплитуды солитонов от высоты над поверхностью планеты и скорости солитонов.

Ключевые слова: пылевая плазма, экзосфера Меркурия, нелинейные волны, пылевые звуковые солитоны

DOI: 10.31857/S0367292123600814, **EDN:** EHOFRK

ВВЕДЕНИЕ

Пылевая плазма у поверхности планет и их спутников является одним из объектов исследования в современной науке [1–11]. В связи с планируемыми миссиями на Меркурий обретает актуальность исследование этой далеко не самой хорошо изученной планеты Солнечной системы. В предыдущие годы было проведено только две исследовательские миссии к этой планете — Маринер-10 [12] в 1970-х гг. и Мессенджер [13] в 2008–2015 гг. Особенности условий у поверхности Меркурия определяются, в первую очередь, близостью к Солнцу. Меркурий — сухой мир, покрытый кратерами, обладающий крайне разреженной атмосферой — экзосферой [14–17], что роднит его с Луной. Ещё одной особенностью Меркурия является вытянутая орбита с эксцентриситетом 0.205, что приводит к необходимости учитывать различия в потоке приходящего солнечного излучения в разных точках орбиты. Меркурий, в отличие от Луны, обладает собственным

магнитным полем [18–20]. Кроме того, планета очень медленно вращается вокруг своей оси, день на Меркурии длится приблизительно 88 земных суток. Длительный световой день потенциально дает возможность развиваться медленным явлениям, связанным с процессами, происходящими при солнечном освещении. Мы будем проводить рассмотрение только для освещенной стороны планеты, когда важную роль играет фотоэффект.

Основные параметры пылевой плазмы вблизи поверхности Меркурия были получены ранее [21, 22]. Здесь мы вкратце приведем описание методов и результаты, необходимые для дальнейшего изложения. Плазменно-пылевая система над поверхностью Меркурия может состоять из взвешенных пылевых частиц, фотоэлектронов, в областях вблизи магнитных полюсов также и из электронов и ионов солнечного ветра. Концентрация молекул газа в экзосфере Меркурия у поверхности планеты, по-видимому, не превышает 10^6 см^{-3} (см., например, [16]). Концентрация фо-

тоэлектронов у поверхности Меркурия может достигать значений 10^5 см^{-3} [21, 22]. Рассматривая баланс сил, действующих на каждую пылевую частицу в зависимости от ее заряда и массы, можно получить распределение пылевых частиц над поверхностью планеты в зависимости от высоты, где каждому размеру частиц будет соответствовать максимальная высота подъема. Одновременное решение уравнения, определяющего баланс токов на пылевую частицу (фотоэлектронов с поверхности планеты, фотоэлектронов с пылевых частиц, электронов и ионов солнечного ветра, в случае его наличия в рассматриваемой области), позволяет определить заряд пылевой частицы. В случае отсутствия солнечного ветра плазменно-пылевая система состоит из пылевых частиц и электронов. Заряд пылевой частицы определяется балансом токов электронов и ионов на частицу и током фотоэлектронов с поверхности частицы. Решение самосогласованной задачи определения параметров пылевых частиц над поверхностью Меркурия проводится с помощью итерационных методов [21]. При этом рассматривается баланс между гравитационной и электростатической силами, действующими на пылевую частицу, учитывается уравнение Пуассона, связывающее электрическое поле на определенной высоте с концентрацией пылевых частиц на этой высоте. Ввиду отсутствия данных о распределении пылевых частиц на поверхности Меркурия по размерам используются аналогичные данные для Луны [23]. Рассматривая определенную точку поверхности Меркурия, необходимо определиться не только с углом между местной нормалью и направлением на Солнце, но и с расстоянием от планеты до Солнца в данный момент времени, а также понять, защищает ли магнитное поле планеты эту область от солнечного ветра. Поскольку соотношение между углом между местной нормалью к поверхности и направлением на Солнце и магнитной широтой для фиксированной точки на поверхности Меркурия все время изменяется, то мы будем рассматривать четыре варианта: планета находится в афелии либо в перигелии, солнечный ветер достигает или не достигает поверхности.

На рис. 1 приведены зависимости высоты подъема пылевой частицы над поверхностью Меркурия от заряда пылевой частицы для четырех описанных ситуаций. Солнечный ветер необходимо учитывать в ситуациях, когда рассматриваемая область лежит вблизи магнитных полюсов, в остальных случаях магнитосфера Меркурия защищает приповерхностную плазму от частиц солнечного ветра.

В запыленной экзосфере Меркурия для колебаний с частотами ω , лежащими в диапазоне $kv_{Td} \ll \omega \ll kv_{TiS}$, где k — волновой вектор,

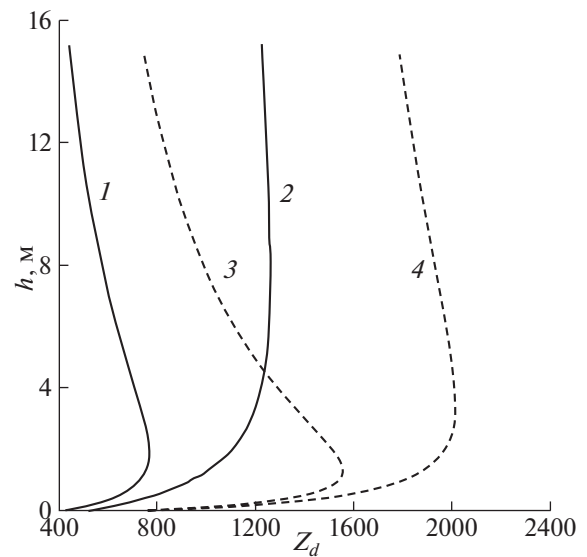


Рис. 1. Зависимость высоты подъема пылевой частицы над поверхностью Меркурия от заряда пылевой частицы (в единицах заряда электрона) для разных условий: 1 — афелий с солнечным ветром, 2 — афелий без солнечного ветра, 3 — перигелий с солнечным ветром, 4 — перигелий без солнечного ветра.

$v_{Td(iS)} = \sqrt{T_{d(iS)}/m_{d(iS)}}$, $T_{d(iS)}$, $m_{d(iS)}$ — температура и масса пылевых частиц (ионов солнечного ветра), можно ожидать развития волновых возмущений с дисперсионным уравнением, соответствующим уравнению для пылевых звуковых волн [22]. В окрестности терминатора аналогично ситуации на Луне [24, 25] можно ожидать развития неустойчивости, приводящей к возбуждению пылевых звуковых волн большой амплитуды. В данной работе рассмотрим нелинейные волны в виде солитонов и периодических структур. Как было показано ранее [21, 22], роль ионов солнечного ветра при рассмотрении волновых процессов, в частности пылевого звука, незначительна, поэтому можно свести рассмотрение к уравнениям, описывающим динамику пылевых частиц и электронов.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ

Будем рассматривать одномерные возмущения вдоль координаты x , направленной горизонтально. Пылевые звуковые нелинейные волны, в том числе солитоны, описываются системой уравнений, состоящей из уравнения Пуассона для потенциала и уравнений, задающих концентрации плазменных компонент. Запишем уравнение Пуассона в виде

$$\partial^2 \phi / \partial x^2 = 4\pi e(n_e - n_d Z_d), \quad (1)$$

где ϕ — самосогласованный потенциал в плазме, x — горизонтальная координата, n_d , n_e — концен-

трации пылевых частиц и электронов соответственно, $-e$ – заряд электрона, Z_d – заряд пылевой частицы, выраженный в количестве электронов.

Роль пыли характеризуется уравнениями непрерывности и Эйлера:

$$\partial n_d / \partial t + \partial (n_d v_d) / \partial x = 0, \quad (2)$$

$$\partial v_d / \partial t + v_d (\partial v_d / \partial x) = -(e Z_d / m_d) (\partial \phi / \partial x), \quad (3)$$

где v_d – направленная скорость пылевой частицы, m_d – масса пылевой частицы.

Уравнения (1)–(3) справедливы при горизонтальном распространении солитонов на высотах h много больших дебаевского радиуса $\lambda_{De} = \sqrt{T_e / 4\pi n_e e^2}$, где T_e – температура электронов.

В условиях, когда в результате действия фотоэффекта пылевые частицы приобретают положительные заряды, а электроны и ионы безынерционны (что выполняется на временных масштабах, характерных для пылевых звуковых солитонов), потенциал солитона имеет положительный знак и представляет собой потенциальную яму для электронов. Если тепловая скорость электронов v_{Te} такова, что выполняется следующее неравенство $\tau_s \geq l_s / v_{Te}$, где l_s , τ_s – характерные пространственные и временные масштабы солитона соответственно, то выполняется условие для адиабатического захвата и электроны подчиняются распределению Гуревича [26]

$$n_e = n_{e0} \left[\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{e\phi/T_e}} e^{-u^2} du \right) e^{\frac{e\phi}{T_e}} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{e\phi}{T_e}} \right]. \quad (4)$$

Здесь n_{e0} – равновесная концентрация электронов. В нашем случае для пылевых звуковых солитонов временной масштаб можно оценить как $\tau_s \sim \sqrt{m_d / 4\pi n_d e^2 Z_d^2}$, а пространственный масштаб составляет несколько дебаевских радиусов электронов $l_s / v_{Te} \sim \sqrt{m_e / 4\pi n_e e^2}$, поэтому выполняется условие адиабатического захвата и необходимо использовать распределение Гуревича (4) для электронов.

Решать полученную систему (1)–(4) будем с использованием метода сагдеевских потенциалов. При этом для получения волны, движущейся с постоянной скоростью, перейдем в систему отсчета, движущуюся в положительном направлении вдоль оси Ox со скоростью M : $\xi = x - Mt$. Решение системы будем искать в безразмерном виде, используя следующие безразмерные величины

$$\begin{aligned} e\phi/T_e &\rightarrow \phi, & M/C_{sd} &\rightarrow M, \\ \xi/\lambda_{De} &\rightarrow \xi, & C_{sd} &= \sqrt{T_e/m_d}. \end{aligned}$$

Для поиска пылевых звуковых нелинейных волн в пылевой плазме у поверхности Меркурия систему уравнений (1)–(4) в безразмерных переменных можно представить в виде:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d\phi}{d\xi} \right)^2 + V(\phi) = E, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V(\phi) = 1 - \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\phi}} e^{-u^2} du \right) e^{\phi} - \frac{2\sqrt{\phi}}{\sqrt{\pi}} - \\ - \frac{4\phi^{3/2}}{3\sqrt{\pi}} + \frac{n_{d0}}{n_{e0}} M \left(M - \sqrt{M^2 - 2Z_d \phi} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $V(\phi)$ – сагдеевский потенциал, а E – некоторая константа. Принимая $E = 0$, получим решение в виде уединенных волн. Для существования нелинейных пылевых звуковых структур необходимо, чтобы сагдеевский потенциал имел локальный максимум при $\phi = 0$. В нашем случае это условие выполняется, если

$$M \geq \sqrt{\frac{n_{d0}}{n_{e0}}} Z_d.$$

Кроме того, необходимо наличие по крайней мере одного действительного решения в области положительного потенциала, что эквивалентно условию:

$$V\left(\frac{M^2}{2Z_d}\right) \geq 0.$$

На рис. 2 представлены зависимости $V(\phi)$ для двух различных значений M . На рис. 3 показана зависимость $\phi(\xi)$ для $Z_d = 500$ и $M = 30$.

Зависимость амплитуды солитона от высоты над поверхностью планеты h , а также от скорости распространения солитона M представлена на рис. 4 для а) ситуации, когда планета находится в афелии и рассматриваемая область попадает в район магнитного полюса, то есть с учетом влияния солнечного ветра; б) ситуации, когда Меркурий находится в перигелии и рассматриваемая область находится в районе магнитного полюса; в) Меркурий в афелии, солнечный ветер не оказывает влияния, то есть рассматриваемая область находится вдали от магнитных полюсов; г) Меркурий в перигелии, солнечный ветер не влияет. Температура электронов для ситуации, когда планета находится в афелии, составляет 2.30 эВ, а когда Меркурий в перигелии – 2.38 эВ. Размер взвешенных пылинок порядка 100 нм, при этом $C_{sd} \approx 74$ см/с. В размерных единицах амплитуды солитонов могут достигать значений 3.5×10^{-2} ед. СГСЭ при скоростях распространения солитонов порядка 10^4 см/с.

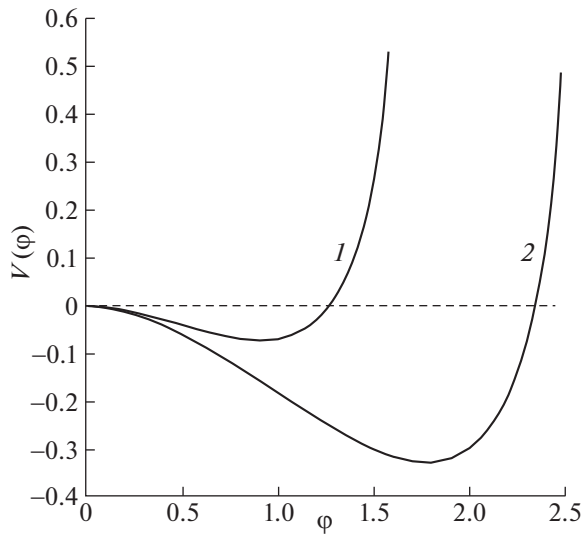


Рис. 2. Сэгдеевский потенциал в зависимости от потенциала солитона для $M = 40$ (кривая 1) и $M = 50$ (кривая 2).

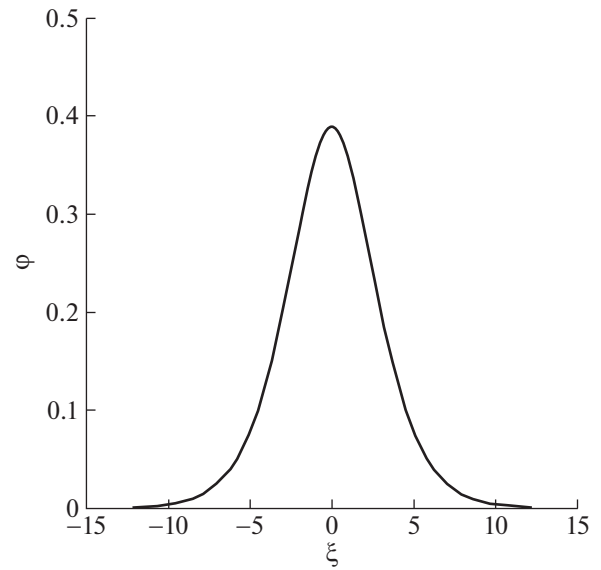


Рис. 3. Профиль потенциала солитона для $Z_d = 500$ и $M = 30$.

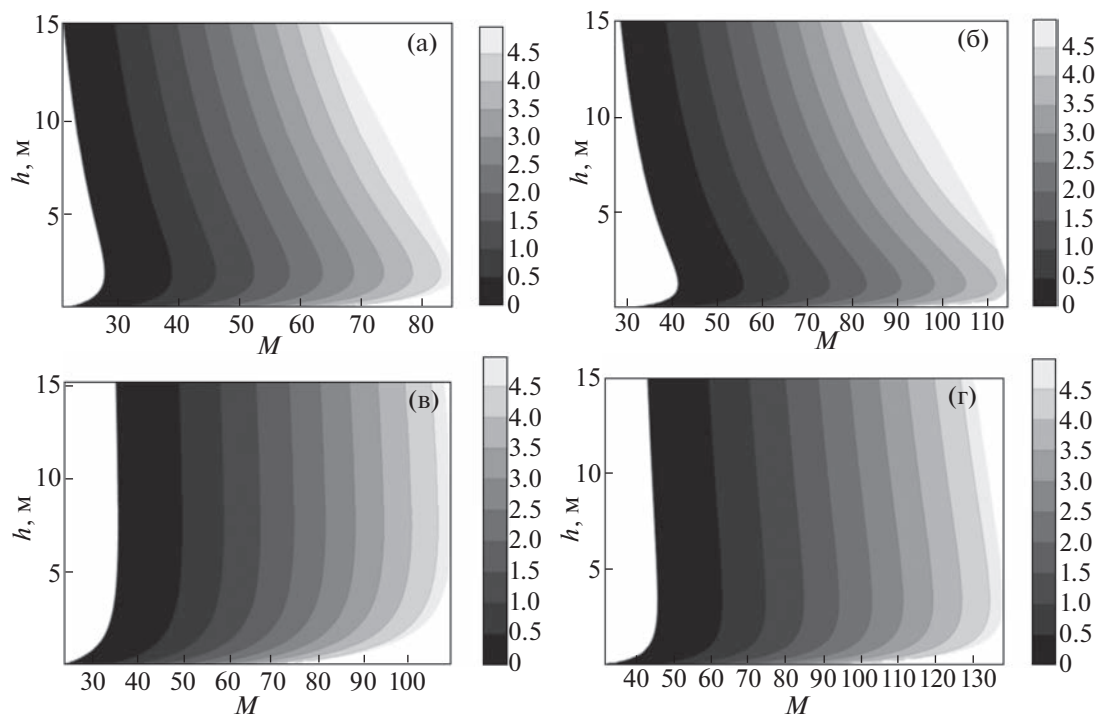


Рис. 4. Зависимость безразмерной амплитуды солитона от высоты над поверхностью планеты h , а также от безразмерной скорости распространения солитона M в афелии (а, в) и перигелии (б, г). Расчеты для (а) и (б) проведены с учетом влияния солнечного ветра, для (в) и (г) – без учета солнечного ветра (вне магнитных полюсов).

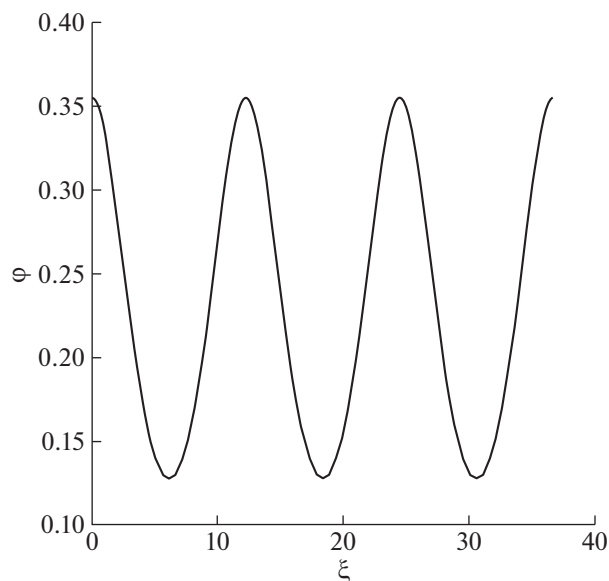


Рис. 5. Нелинейная периодическая волна для $M = 30$ и $Z_d = 500$.

В случае, когда правая часть уравнения (5) меньше нуля, можно получить решение в виде периодической волны [27]. Для нахождения зависимости $\phi(\xi)$ достаточно проинтегрировать выражение, следующее из уравнения (5):

$$d\xi = \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \frac{d\phi}{\sqrt{2(E - V(\phi))}},$$

где $\phi_{\min}$, $\phi_{\max}$ — значения потенциала, соответствующие точкам пересечения сагдеевского потенциала $V(\phi)$ с горизонтальной прямой $V = E$. Для примера рассмотрим случай, когда $E = V_{\min}/2$, т.е. константа E отрицательна и составляет половину от минимального значения сагдеевского потенциала $V_{\min}$. Зависимость $\phi(\xi)$ в безразмерных единицах для этого случая для $M = 30$ и $Z_d = 500$ представлена на рис. 5. Переходя к размерным единицам, можно оценить амплитуду солитона как 2.77×10^{-3} ед. СГСЭ при скорости распространения 2.2×10^3 см/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экзосфере Меркурия ожидается наличие плазменно-пылевой системы, состоящей из взвешенных пылевых частиц, фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра. В пылевой плазме у поверхности планеты могут распространяться нелинейные уединенные и периодические пылевые звуковые волны. Характерные амплитуды солитонов и нелинейных периодических волн могут достигать значений порядка 10^{-3} – 10^{-2} ед. СГСЭ.

Среда вблизи поверхности Меркурия во многом схожа с лунной экзосферой, где возможна генерация различных типов волн [23, 28–33], которые могут быть зафиксированы космическими аппаратами и посадочными модулями. Стоит отметить, что на окололунной орбите с помощью аппарата SELENA миссии KAGUYA наблюдались три типа солитонов [34, 35]. При планировании будущих миссий на Меркурий, в том числе российского космического зонда Меркурий-П, необходимо учитывать возможность существования нелинейных пылевых звуковых волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berg O.E., Richardson F.F., Burton H. // Apollo 17 preliminary science report. NASA Spec. Publ. 16-1–16-9. SP-330. 1973.
2. Berg O.E., Wolf H., Rhee J. // Interplanetary Dust and Zodiacal Light / Eds H. Elsässer and H. Fechtig. New York: Springer, 1976. P. 233.
3. Määttä A., Listowski C., Montmessin F., Maltagliati L., Reberac A., Joly L., Bertaux J.L. // Icarus. 2013. V. 223 (2). P. 892–941.
4. Fedorova A.A., Montmessin F., Rodin A.V., Korablev O.I., Määttä A., Maltagliati L., Bertaux J.L. // Icarus. 2014. V. 231. P. 239–260.
5. Montmessin F., Bertaux J.L., Quémerais E., Korablev O., Rannou P., Forget F., Perriera S., Fussend D., Lebonnois S., Réberac A. // Icarus. 2006. V. 183 (2). P. 403.
6. Montmessin F., Gondet B., Bibring J.P., Langevin Y., Drossart P., Forget F., Fouchet T. // Journal of Geophysical Research: Planets, 2007. V. 112 (E11).
7. Извекова Ю.Н., Попель С.И. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 12. С. 1010–1017.
8. Голубь А.П., Попель С.И. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. № 7. С. 440–445.
9. Голубь А.П., Попель С.И. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 8. С. 741–747.
10. Zakharov A.V., Popel S.I., Kuznetsov I.A., Borisov N.D., Rosenfeld E.V., Skorov Yu., Zelenyi L.M. // Physics of Plasmas. 2022. V. 29. № 11. P. 110501.
11. Копнин С.И., Шохрин Д.В., Попель С.И. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 2. С. 163–167.
12. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/mariner-10/in-depth/>
13. Solomon S.C., McNutt R.L., Gold R.E., Domingue D.L. // Space Sci. Rev. 2007. V. 131. P. 3.
14. Exner W., Simon S., Heyner D., Motschmann U. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2020. V. 125. № 7. P. e2019JA027691.
15. Broadfoot A.L., Shemansky D.E., Kumar S. // Geophys. Res. Lett. 1976. V. 3. № 10. P. 577–580.
16. Potter A., Morgan T. // Science. 1985. V. 229. № 4714. P. 651–653.
17. Bida T.A., Killen R.M., Morgan T.H. // Nature. 2000. V. 404. № 6774. P. 159–161.
18. Ness N.F., Behannon K.W., Lepping R.P., Whang Y.C. // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 2708.

19. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Slavin J.A., Korth H., Anderson B.J., Baker D.N., Boardsen S.A., Johnson C.L., Purucker M.E., Sarantos M., Solomon S.C. // *Icarus*. 2010. V. 209. P. 23.
20. Stanley S., Glatzmaier G.A. // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 152. P. 617.
21. Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M. // *Physics of Plasmas*. 2023. V. 30. № 4. 043701.
22. Извекова Ю.Н., Попель С.И., Голубь А.П. Волновые процессы в пылевой плазме у поверхности Меркурия // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. № 7. С. 695–702.
23. Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2013. Т. 47 (6). С. 455–466.
24. Popel S.I., Morfill G.E., Shukla P.K., and Thomas H. // *Journal of Plasma Physics*. 2013. V.79. Issue 06. P. 1071–1074.
25. Popel S.I., Zelenyi L.M., Atamaniuk B. // *Physics of Plasmas*. 2015. V. 22. № 12. P. 123701.
26. Лившиц Л.Д., Путаевский Л.П. Теоретическая физика. Т. 10. Физическая кинетика. М.: Физматлит, 2002. С. 182.
27. Lu G., Liu Y., Wang Y., Stenflo L., Popel S.I., Yu M.Y. Fully nonlinear electrostatic waves in electron–positron plasmas // *Journal of plasma physics*. 2010. V. 76 (3–4). P. 267–275.
28. Izvekova Yu.N., Morozova T.I., Popel S.I. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018. V. 46. № 4. P. 731.
29. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. Волновые процессы в пылевой плазме у поверхности Луны // *Физика плазмы*. 2015. Т. 41. № 10. С. 867–876.
30. Попель С.И., Морозова Т.И. Волновые процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. № 5. С. 474–484.
31. Popel S.I., Kassem A.I., Izvekova Yu.N., Zelenyi L.M. // *Physics Letters A*. 2020. V. 384. Issue 26. P. 126627.
32. Копнин С.И., Попель С.И. // *Письма в ЖТФ*. 2021. Т. 47. Вып. 9. С. 29–32.
33. Извекова Ю.Н., Попель С.И. // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 11. С. 1061–1065.
34. Hashimoto K. *et al.* Electrostatic solitary waves associated with magnetic anomalies and wake boundary of the Moon observed by KAGUYA // *Geophysical Research Letters*. 2010. Т. 37. № 19.
35. Matsumoto H. *et al.* Electrostatic solitary waves (ESW) in the magnetotail: BEN wave forms observed by GEOTAIL // *Geophysical Research Letters*. 1994. Т. 21. № 25. С. 2915–2918.