

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Статистические и модельные оценки связи размеров и времени жизни полярных мезоциклонов

И. И. Мохов,^{1,2, a} А. Г. Порошенко¹¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики атмосферы
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2² Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН.
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

Поступила в редакцию 07.07.2021, после доработки 29.09.2021, принята к публикации 30.09.2021.

Получены статистические оценки связи между характерными размерами и временем жизни полярных мезоциклонов (ПМЦ) с использованием данных STARS (Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting Polar Lows) для периода 2002–2010 гг. Отмечены особенности их нелинейной связи. Предложено модельное объяснение степенной и экспоненциальной, в простейшем случае линейной, зависимости для наиболее крупномасштабных и долгоживущих ПМЦ.

Ключевые слова: данные STARS, связь размеров и времени жизни полярных мезоциклонов, модельные оценки.

УДК: 551.5. PACS: 92.10.ak, 92.60.-e.

ВВЕДЕНИЕ

Полярные мезоциклоны (ПМЦ) входят в число опасных природных явлений в атмосфере арктических и антарктических широт. Исследованию режимов ПМЦ и их изменчивости посвящено много работ [1–39].

ПМЦ обычно формируются в холодный период года над свободной ото льда морской поверхностью, когда холодный полярный воздух натекает на область с существенно более теплой морской поверхностью. Области формирования ПМЦ в Северном и Южном полушариях представлены, в частности, в [22] (см. также [2, 28]). Характерный размер ПМЦ составляет от нескольких десятков до нескольких сотен километров. Типичное время существования ПМЦ порядка суток. Выделяются разные типы ПМЦ, в том числе в форме спирали и запятой. Полярных мезоциклонов спиралевидной формы в целом меньше, чем ПМЦ типа запятых. Для ПМЦ спиралевидного типа проявляется, подобно тропическим циклонам (тайфунам), «глаз» При этом ПМЦ существенно слабее и с меньшим временем жизни, чем тропические ураганы (тайфуны). С интенсивными ПМЦ связаны экстремальные погодные условия, штормовые волнение и ветер, обледенение судов и сооружений, снежные заряды [2]. Данные о ПМЦ доступны со второй половины 20 века [3].

Для образования ПМЦ существенны бароклинные возмущения [4]. При этом, по сравнению с циклонами средних широт, в формировании которых ключевая роль связана с бароклиной неустойчивостью, для ПМЦ очень существенны конвективные процессы, как и для тропических циклонов [5–7, 10]. Еще Т. Бергерон [40] отмечал особенности циклогенеза над относительно теплой водой зимой. В разных полярных (арктических и антарктических)

регионах различна относительная роль разных факторов в формировании ПМЦ, том числе конвекции, бароклинности, адвекции циклонической завихренности, орографического форсинга. Для развития вихрей, генерируемых в бароклиной атмосфере, важны и другие процессы [1, 11]. При этом роль конвективных процессов значительно проявляется в арктических широтах, где турбулентные потоки явного и скрытого тепла могут отличаться на порядок в различных регионах, тогда как в антарктических широтах потоки у поверхности относительно малы. Перепады температуры на морской поверхности и приповерхностного воздуха в антарктических широтах не достигают значений, проявляющихся в арктических регионах. Для антарктических ПМЦ отмечаются общие закономерности с ПМЦ в северной части Тихого океана с ограниченной ролью конвективных процессов. С другой стороны, в арктических регионах в целом меньше роль орографических особенностей (за исключением областей вблизи Гренландии) по сравнению с областями вблизи Антарктиды [2].

В [18], например, проведен анализ характеристик ПМЦ в атмосфере над высокоширотным Северо-Европейским бассейном Арктики по данным для последних десятилетий 20 века [2, 12, 26]. Отмечены особенности годового хода и межгодовые вариации параметров ПМЦ, имеющих форму спирали и запятной. При этом на фоне значительных межгодовых вариаций значимых трендов характеристик арктических мезоциклонов над Северо-Европейским бассейном Арктики не выявлено. Во многих работах анализируются региональные распределения ПМЦ в зависимости от их характеристик, в том числе в зависимости от их размеров и длительности, например, [2, 13–15, 32, 35].

В данной работе представлены оценки связи между характерными размерами и временем жизни ПМЦ.

^a E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru

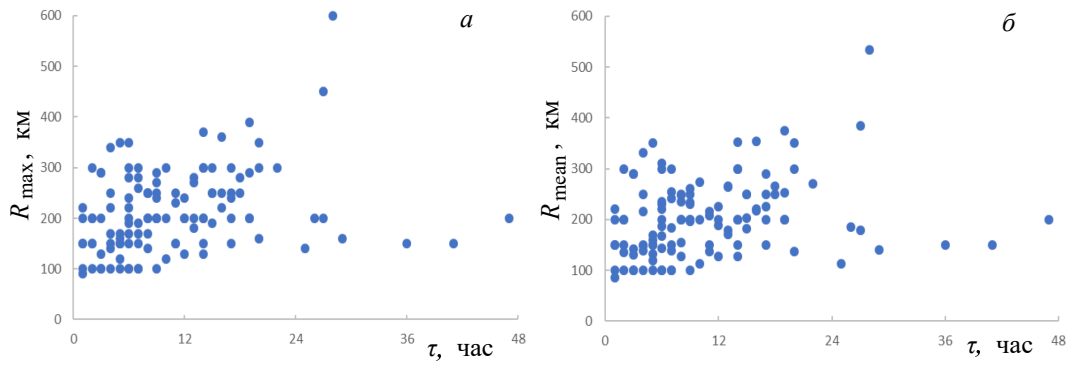


Рис. 1. Характерная величина ПМЦ R [км] в зависимости от продолжительности ПМЦ τ [час.]: $R = R_{\max}$ (а), $R = R_{\text{mean}}$ (б)

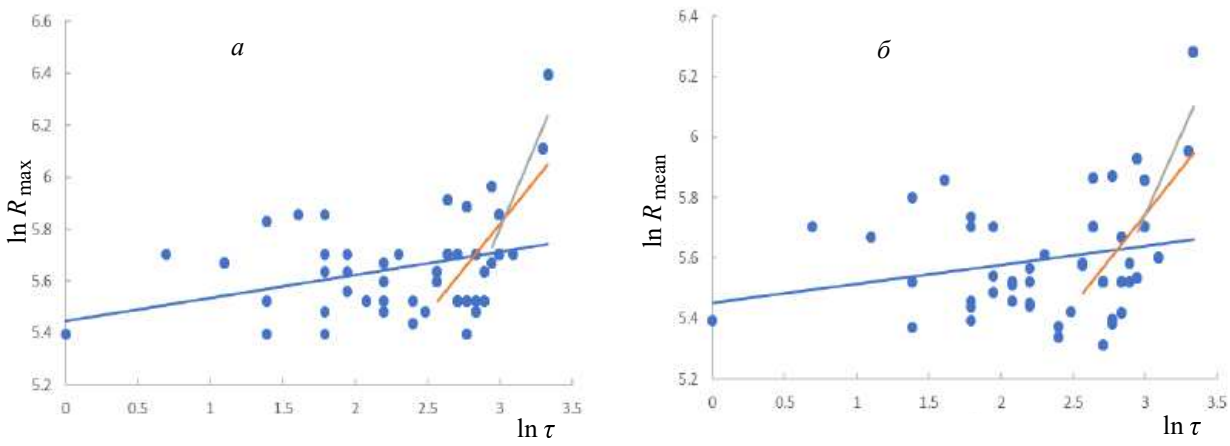


Рис. 2. Характерный размер ПМЦ R [км] (> 200 км) в зависимости от длительности ПМЦ τ [час.]: (а) $\ln R_{\max} : \ln \tau$, (б) $\ln R_{\text{mean}} : \ln \tau$. Прямые соответствуют линейным регрессиям для всех проанализированных ПМЦ с $R > 200$ км (синие линии), для ПМЦ с $\tau > 12$ час. (красные линии) и для ПМЦ с $\tau > 18$ час. (зеленые линии)

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

При анализе использовались данные STARS для 120 ПМЦ на основе спутниковых наблюдений для периода 2002–2010 гг. [24, 33, 38]. Данные STARS, основанные на спутниковых инфракрасных изображениях, полученных с помощью прибора AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer), характеризуют параметры арктических мезоциклонов над Норвежским и Баренцевым морями с часовым разрешением. В частности при анализе использовались данные для максимальных (R_{\max}) и средних (R_{mean}) размеров ПМЦ за время их жизни по данным, представленным в [24]. Более детально анализировалась связь размеров и времени жизни ПМЦ для 50 наиболее крупномасштабных циклонов (с характерным размером более 200 км). Дополнительный анализ проводился для более долгоживущих ПМЦ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1,а,б показан характерный размер ПМЦ R [км] в зависимости от длительности ПМЦ τ [час.]: $R = R_{\max}$ (а), $R = R_{\text{mean}}$ (б). На рис. 1 можно выделить разные ветви зависимости между характерным размером и длительностью ПМЦ. В частности, можно выделить особенности ПМЦ с $R \leq 200$ км и с $R > 200$ км. Нелинейные особенности проявляются для наибольших ПМЦ в зависимости от их длительности.

Рис. 2,а,б характеризует размер ПМЦ R [км] (> 200 км) в зависимости от продолжительности ПМЦ τ [час.] в логарифмических масштабах: (а) $\ln R_{\max} : \ln \tau$, (б) $\ln R_{\text{mean}} : \ln \tau$. Регрессии

$$\begin{aligned} \ln R_{\max} &= a + k_M \ln \tau, \\ \ln R_{\text{mean}} &= b + k_m \ln \tau \end{aligned} \quad (1)$$

(прямые на рис. 2) соответствуют степенным зависимостям

$$R_{\max} \sim \tau^{k_M}, \quad R_{\text{mean}} \sim \tau^{k_m}. \quad (2)$$

Синие линии на рис. 2 характеризуют соответствующие регрессии для всех проанализированных ПМЦ с $R > 200$ км, красные линии соответствуют ПМЦ с $\tau > 12$ час., зеленые линии соответствуют ПМЦ с $\tau > 18$ час.

В табл. 1 представлены оценки k_M и k_m с их среднеквадратическими отклонениями, а также коэффициенты корреляции r для соответствующих регрессий $\ln R$ на $\ln \tau$ для 37 ПМЦ с $\tau > 6$ час., 23 ПМЦ с $\tau > 12$ час. и 7 ПМЦ с $\tau > 18$ час.

Наиболее статистически значимые оценки k_M и k_m получены для более долгоживущих ПМЦ с $R > 200$ км (около 2/3 для ПМЦ с $\tau > 12$ час. и до 4/3 для ПМЦ с $\tau > 18$ час.). Согласно

Таблица 1. Оценки k_M и k_m с их среднеквадратическими отклонениями, а также коэффициенты корреляции r для соответствующих линейных регрессий $\ln R$ на $\ln \tau$ (в скобках)

$R > 200$ км	k_M (r)	k_m (r)
$\tau > 6$ час.	0.09 ± 0.04 (0.32)	0.06 ± 0.04 (0.23)
$\tau > 12$ час.	0.69 ± 0.19 (0.64)	0.60 ± 0.20 (0.55)
$\tau > 18$ час.	1.30 ± 0.43 (0.80)	1.07 ± 0.50 (0.69)

представленным в табл. 1 оценкам

$$R_{\max} \sim \tau^{0.69}, \quad R_{\text{mean}} \sim \tau^{0.60} \quad \text{при } \tau > 12 \text{ ч,}$$

$$R_{\max} \sim \tau^{1.30}, \quad R_{\text{mean}} \sim \tau^{1.07} \quad \text{при } \tau > 18 \text{ ч.}$$

Связь характерных размеров ПМЦ со временем их жизни можно оценить на основе простой модели, использованной в [41] для объяснения степенной (корневой) зависимости времени жизни тропических циклонов от их интенсивности. Формирование ПМЦ, как и формирование тропических циклонов, связано с конвективными процессами. При этом кинетическая энергия атмосферных вихрей (E_k) увеличивается за счет потока скрытой теплоты поступающей от поверхности океана (F_H) с потерями на трение о поверхность океана (F_D), зависящими от скорости ветра V :

$$dE_k/dt = F_H - F_D, \quad (3)$$

где $E_k \sim V^2$. Потоки скрытого тепла F_H и трения F_D можно представить в виде

$$F_H \sim C_H V, \quad F_D \sim C_D V^2,$$

где C_H и C_D — соответственно коэффициенты теплообмена и сопротивления. Эти коэффициенты, в свою очередь, зависят от скорости ветра. Существуют различные эмпирические параметризации для оценки этих зависимостей C_H и C_D . При степенных зависимостях C_H и C_D от V

$$C_H \sim V^m, \quad C_D \sim V^n,$$

из (3) следует

$$dV^2/dt = c_H V^{1+m} - c_D V^{2+n}. \quad (4)$$

Интенсивность ПМЦ можно характеризовать абсолютной величиной перепада давления ΔP в центре циклона относительно фонового режима его периферии. При $\Delta P \sim V^2$ (аналогично ТЦ [41]) характерное время $\tau(\tau_i)$ ПМЦ в зависимости от характерных (максимальных) интенсивности ΔP и скорости ветра V в случае относительно малых потерь на трение при

$$dV^2/dt = c_H V^{1+m} \quad (5)$$

можно представить в виде

$$\tau \sim V^{1-m} \sim \Delta P^{(1-m)/2}, \quad \text{если } m \neq 1,$$

$$\tau \sim \ln V \sim \ln \Delta P^{1/2}, \quad \text{если } m = 1.$$

Соответствующий анализ можно провести и при учете эффектов трения.

В простейшем случае при $C_H = \text{const}$, т.е. при $m = 0$,

$$\tau \sim V \sim \Delta P^{1/2}.$$

При

$$R \sim \Delta P^{1/2}.$$

(см. [16, 42, 43], а также [2])

$$R \sim \tau. \quad (6)$$

Модельная зависимость (6) соответствует зависимостям (1), (2) с $k_M = 1$, $k_m = 1$. Подобной модельной зависимости соответствуют эмпирические зависимости R от τ при τ более полусуток (см. табл. 1).

Случаю $C_H \sim V$ (при $m = 1$) соответствует экспоненциальная зависимость

$$R \sim \exp(K\tau) \quad (7)$$

В табл. 2 представлены количественные оценки для (7), полученные с использованием соответствующих регрессий

$$\ln R_{\max} = a + K_M \tau, \quad \ln R_{\text{mean}} = b + K_m \tau \quad (8)$$

для 50 более крупномасштабных ПМЦ (с $R > 200$ км), в том числе для 23 ПМЦ с $\tau > 12$ час. и 7 ПМЦ с $\tau > 18$ час. При этом значения $\tau_M \equiv 1/K_M$ и $\tau_m \equiv 1/K_m$ соответствуют характерным временам в экспоненциальной зависимости (7) для R_{\max} и R_{mean} . Диапазоны неопределенности оценок τ_M и τ_m в табл. 2 (в скобках) получены с использованием среднеквадратических отклонений для коэффициентов регрессий в (8).

Таблица 2. Оценки τ_M и τ_m , а также коэффициенты корреляции r для соответствующих линейных регрессий $\ln R$ на τ (в квадратных скобках)

$R > 200$ км	τ_M , сут. [r]	τ_m , сут. [r]
$\tau > 0$	3.1 (2.4–4.3) [0.45]	3.8 (2.8–5.9) [0.37]
$\tau > 12$ час.	1.1 (0.9–1.4) [0.65]	1.2 (0.9–1.7) [0.82]
$\tau > 18$ час.	0.7 (0.5–1.1) [0.59]	0.9 (0.6–1.4) [0.72]

Согласно табл. 2 характерные времена τ_M и τ_m с увеличением времени жизни ПМЦ уменьшаются до значений менее суток для наиболее долгоживущих циклонов. Максимальные значения коэффициентов корреляции r в табл. 2 для зависимостей (8) получены для $\tau > 12$ час. При этом для наиболее долгоживущих ПМЦ с $\tau > 18$ час. соответствующие коэффициенты несколько уменьшается.

Простая модель для ПМЦ, характеризующая уравнением (4), допускает разные аналитические решения в зависимости от значений параметров m и n [41]. В частности, особенности нелинейной связи R и τ для ПМЦ зависят от учета трения в (3), (4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены статистические оценки связи между характерными размерами и временем жизни ПМЦ с использованием данных STARS (Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting Polar Lows) для периода 2002–2010 гг. Отмечены особенности их нелинейной связи. Предложено модельное объяснение степенной и экспоненциальной, в простейшем случае линейной, связи характерных размеров и времени жизни для наиболее крупномасштабных и долгоживущих ПМЦ.

Подобные оценки связи характеристик ПМЦ полезны для диагностики механизмов формирования и эволюции ПМЦ, в том числе для оценки роли нелинейных процессов. Значимые связи можно использовать для оценки характеристик ПМЦ по имеющимся данным для других характеристик.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ (грант № 19-17-00240). Особенности режимов мезоциклонов над Норвежским и Баренцевым морями оценивались в рамках соглашения № 075-15-2021-577 Министерства науки и высшего образования РФ с ИФА им. А.М. Обухова РАН. Анализ особенностей взаимосвязи характеристик атмосферных циклонов в арктических широтах проводился в рамках соглашения № 075-15-2020-776 с Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Rasmussen E. A., Turner J. (eds). Cambridge, 2003.
2. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика. Мохов И. И., Курганский М. В., Чхетиани О. Г. (ред.) М., 2018.
3. Harley D. G. // Met. Mag. 1960. **89**. P. 146.
4. Harrold T. W., Browning K. A. // Quart. J. R. Met. Soc. 1969. **95**. P. 710.
5. Reed R. J. // Mon. Wea. Rev. 1979. **107**. P. 38.
6. Mullen S. L. // Mon. Weather. Rev. 1979. **107**. P. 1636.
7. Rasmussen E. // J. Atmos. Sci. 1981. **38**. P. 1785.
8. Businger S. // Tellus A. 1985. **37**. P. 419.
9. Forbes G. S., Lottes W. D. // Tellus A. 1985. **37**. P. 132.
10. Emanuel K. A., Rotunno R. // Tellus. 1989. **41A**. P. 1.
11. Turner J., Lachlan-Cope T. A., Thomas J. P. // J. Geophys. Res. 1993. **98**, N D7. P. 13019.
12. Луценко Э. И. // Труды ААНИИ. 1999. **441**. С. 202.
13. Mokhov I. I. // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling. / H. Ritchie (Ed.). 2000. WMO TD-No.987. P.2.18.
14. Mokhov I. I., Pripitnev S. G. // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling / H. Ritchie. 2001. WMO/TD-No.1064. P.2.22.
15. Mokhov I. I., Akperov M. G. // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling / J. Cote. 2003. WMO/TD-No.1161. P.02.09.
16. Голицын Г. С. // Доклады РАН. 2005. **401**, № 1. С. 72.
17. Condron A., Bigg G. R., Renfrew I. A. // Mon. Wea. Rev. 2006. **134**, N 5. P. 1518.
18. Мохов И. И., Акперов М. Г., Лагун В. Е., Луценко Э. И. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. **43**, № 3. С. 291.
19. Голицын Г. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. **44**, № 5. С. 579.
20. Гурвич И. А., Митник Л. М., Митник М. Л. // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 58.
21. Zahn M., von Storch H. // Geophys. Res. Lett. 2008. **35**. L22702.
22. Луценко Э. И., Лагун В. Е. Полярные мезомасштабные циклонические вихри в атмосфере Арктики. Справочное пособие. СПб, 2010.
23. Kolstad E. W. // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. **137**. P. 1749.
24. Noer G., Saetra S., Lien T., Gusdal Y. // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. **137**. P. 1762.
25. Chen F., Geyer B., Zahn M., von Storch H. // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2012. **23**, N 3. P. 291.
26. Луценко Э. И., Лагун В. Е. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 76.
27. Laffineur T., Claud C., Chaboureaud J.-P., Noer G. // Mon. Wea. Rev. 2014. **142**. P. 2271.
28. Заболотских Е. В., Гурвич И. А., Шапрон Б. // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 64.
29. Rojo M., Claud C., Mallet P.-E. et al. // Tellus A. 2015. **67**. 24660.
30. Анискина О. Г., Заболотских Е. В., Шапрон Б. // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 13.
31. Варенцов М. И., Веземская П. С., Заболотских Е. В., Репина И. А. // Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2016. **13**, № 4. С. 168.
32. Смирнова Ю. Е., Заболотских Е. В., Бобылев Л. П., Шапрон Б. // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 27.
33. Акперов М. Г., Мохов И. И., Дембицкая М. А. // Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2017. **14**, № 3. С. 297.
34. Michel C., Terpstra A., Spengler T. // J. Clim. 2018. **31**. P. 2511.
35. Stoll P. J., Graverson R. G., Noer G., Hodges K. // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2018. **144**. P. 2099.
36. Vazaeva N. V., Chkhetiani O. G., Kurgansky M. V. // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2020. **606**. 012065
37. Mokhov I. I., Poroshenko A. G. // Research Activities in Earth System Modelling / E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 4. P. 11.
38. Poroshenko A. G., Akperov M. G., Mokhov I. I. // Research Activities in Earth System Modelling / E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 2. P. 21.
39. Revokatova A., Nikitin M., Rivin G., Rozinkina I., Nikitin A., Tatarinovich E. // Atmosphere. 2021. **12**. P. 137.
40. Bergeron T. // Quart. J. R. Met. Soc. 1954. **80**. P. 131.
41. Мохов И. И., Порошенко А. Г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 25.
42. Акперов М. Г., Бардин М. Ю., Володин Е. М., Голицын Г. С., Мохов И. И. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. **43**, № 6. С. 705.
43. Голицын Г. С., Мохов И. И., Акперов М. Г., Бардин М. Ю. // ДАН. 2007. **413**, № 2. С. 254.

Statistical and Model Estimates of the Relationship between the Size and Lifetime of Polar Lows**I. I. Mokhov^{1,2,a}, A. G. Poroshenko¹**¹*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*²*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia**E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru*

Statistical estimates of the relationship between the characteristic sizes and lifetime of polar lows (PLs) are obtained using the Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting of Polar Lows (STARS) data for 2002–2010. The features of their nonlinear relationship are noted. A model explanation of the power and exponential (linear in the simplest case) relationship for the largestscale and longest-lived PLs is proposed.

Keywords: STARS data, relationship between size and lifetime of polar lows, model estimates.

PACS: 92.10.ak, 92.60.-e.

Received 07 July 2021.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. **76**, No. 6. Pp. 477.

Сведения об авторах

1. Мохов Игорь Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой, научный руководитель ИФА им. А. М. Обухова РАН; тел.: (495) 939-38-06, (495) 951-55-65, e-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru, mokhov@ifaran.ru.
2. Порошенко Анатолий Георгиевич — студент; тел.: (495) 939-38-06, e-mail: poroshenko.ag18@physics.msu.ru.