

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

## Циркуляция, внутренняя волна, интрузия и перенос примесей в озере

Б. И. Самолюбов<sup>1,a</sup>, И. Н. Иванова<sup>1,b</sup>, А. А. Будников<sup>1</sup>, А. И. Цветков<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.<sup>2</sup>Институт биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина РАН.

Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок.

E-mail: <sup>a</sup>samoljubov@phys.msu.ru, <sup>b</sup>ivair@yandex.ru

Статья поступила 22.06.2015, подписана в печать 29.07.2015.

Представлены результаты структурных гидрофизических исследований оз. Плещеево. По данным прямых измерений впервые выявлены распределения параметров течения и состава воды в озере. Проведено сравнение теоретически рассчитанного распределения скорости течения с учетом влияния внутренней волны, циркуляции и интрузии с полученными экспериментальными данными. Выявлена затопленная струя речных вод в озере. Получены измеренные и теоретические распределения концентрации взвеси в струе. Установлено качественное соответствие полученных результатов о влиянии течений на биосферу озера с литературными данными.

**Ключевые слова:** стратифицированные течения, внутренние волны, перенос примесей, интрузия.

УДК: 556.532.5. PACS: 92.10.Lq, 92.10.Wa, 92.40.-t, 92.40.qj.

## Введение

Исследования динамики стратифицированных озер представляют большой фундаментальный и практический интерес, который связан с исследованием влияния гидрофизических процессов на формирование качества воды и развитие водных экосистем. Для прогноза таких процессов необходима информация о всех видах движения вод, включая течения, вихри и внутренние волны. Вместе с тем, несмотря на жизненную важность изучения подобных явлений, остаются достаточно редкими случаи комплексного подхода к исследованиям распределений скорости течения, параметров состава воды и гидробиологических характеристик [1, 2, 3]. В настоящей работе приведены результаты экспедиционных исследований структур полей течений и концентраций примесей в озере Плещеево (юг Ярославской области), данные о гидродинамических процессах в котором были представлены ранее в основном результатами математического моделирования [3]. Полученные результаты прямых измерений сопоставлены с результатами теоретических расчетов.

## 1. Объект и методика исследований

23–25 августа 2014 г. экспедицией физического факультета МГУ выполнена серия гидрофизических измерений на оз. Плещеево. Площадь поверхности озера — 51.5 км<sup>2</sup>, глубина до 25 м. Площадь литорали (до глубины 3 м) — 21%. Крупнейший приток озера — р. Трубеж. Из озера вытекает р. Векса, вблизи истока которой в подледный период сохраняются сильные течения. Для данного озера характерна ветровая активность, сильное взмучивание литорали, устойчивое термическое расслоение

вод в июне–сентябре [4]. Как показано теоретически в работе [3], при любом из преобладающих

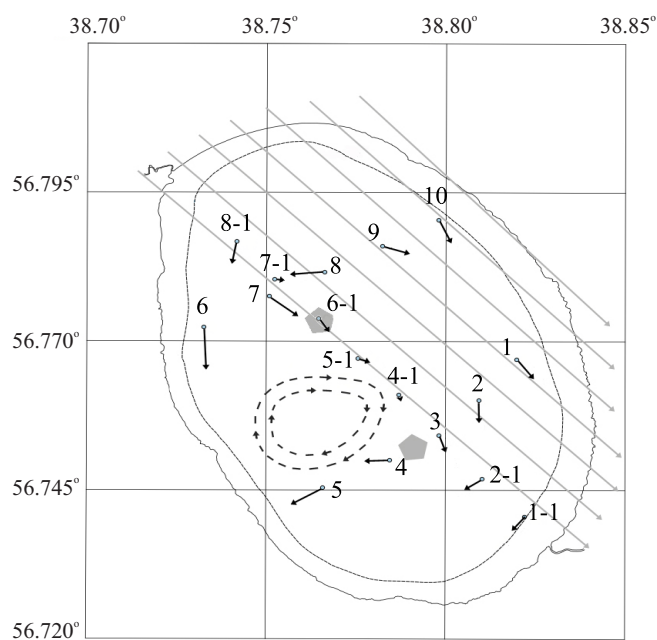


Рис. 1. Распределение скорости в горизонтальной плоскости на глубине 3 м на станциях зондирования (точки с векторами скорости); предполагаемый ход локальной циркуляции (замкнутые пунктирные кривые со стрелками); преобладающее направление ветра (длинные параллельные тонкие стрелки). Другие обозначения: серые шестиугольники — впадины на рельефе дна, цифры у точек соответствуют последовательным номерам вертикалей на разрезе (первая цифра) и номеру разреза (вторая цифра). Одной цифрой пронумерованы вертикали двух поперечных разрезов. Длины векторов скорости масштабированы по ее значениям от 2 до 10 см/с

направлений ветра образуются две вихревые зоны циркуляции, расположенные симметрично относительно продольной или поперечной оси озера. В указанных зонах наблюдается увеличение биомассы зоопланктона [5]. Эти результаты интересны в плане сравнительно-лимнологических исследований и представляют особую ценность с точки зрения экологического контроля экосистемы национального парка «Плещеево озеро», подвергающегося загрязнению в результате хозяйственной деятельности.

В ходе работ проведена серия комплексных зондирований на продольном разрезе по девяти станциям от устья р. Трубеж до истока р. Векса и на двух поперечных разрезах по 10 станциям (рис. 1). Измерения проводились многопараметрическими зондами RCM 9 LW (Aanderaa Instruments) и YSI 600OMS (YSI Incorporated). С шагом 0.5–1 м по глубине измерялись скорость  $U$ , температура  $T$ , электропроводность  $C_k$ , концентрация растворенного кислорода  $O_2$  и мутность воды  $Tu$ . Точность измерений  $U$ ,  $T$ ,  $C_k$ ,  $O_2$  и  $Tu$  составляли 0.5 см/с, 0.02 °C, 0.02 мСм/см, 0.25 мг/л и 0.4 NTU. Параллельно анеморумбометром М-63М измерялась скорость ветра с точностью  $\pm 0.25$  м/с.

## 2. Структуры полей скорости течения и концентраций примесей

Распределение скорости течения, зарегистрированное на разрезах, определяется движениями вод под влиянием внутренней волны сейшевой природы,

ветровой циркуляции и затопленной стратифицированной струи вод р. Трубеж, впадающей в озеро в его южной части. Вертикальная структура такой системы течений неплохо отражается композиционным распределением, которое включает три компоненты:

$$U(z) = U_w + U_{jr} + U_c, \quad (1)$$

где  $U_w$  — волновая,  $U_{jr}$  — интрузионная и  $U_c$  — циркуляционная составляющие скорости течения [6]. Типичные профили скорости, роста плотности воды с глубиной, температуры и концентрации растворенных солей, изображенные на рис. 2, а, б, свидетельствуют об устойчивом распределении плотности и параметров состояния воды, а также о многоядерности функции  $U(z)$ . Теоретические кривые  $U(z)$  в целом правильно отражают особенности измеренных распределений.

Зарегистрированная внутренняя волна характеризуется горизонтальной длиной  $\lambda_x = 4$  км, вертикальной длиной  $\lambda_z = 2(H - z_T)$  для низшей моды, фазовой скоростью  $c_w = 0.2$ –0.3 см/с, периодом 3.6 ч, горизонтальной составляющей скорости  $U_w$  от  $-5$  до 5 см/с. Высота термоклина  $z_T = 5$ –13 м. Кроме того, выявлено течение, вызванное низшей модой сейши с вертикальной длиной равной удвоенной средней глубине озера в его пелагиали (23 м). Эта составляющая (рис. 2, в) во время измерений на разрезе, которое составляло четверть ее периода, изменялась по модулю с высотой над уровнем дна от нуля до  $-2$  см/с у поверхности воды.

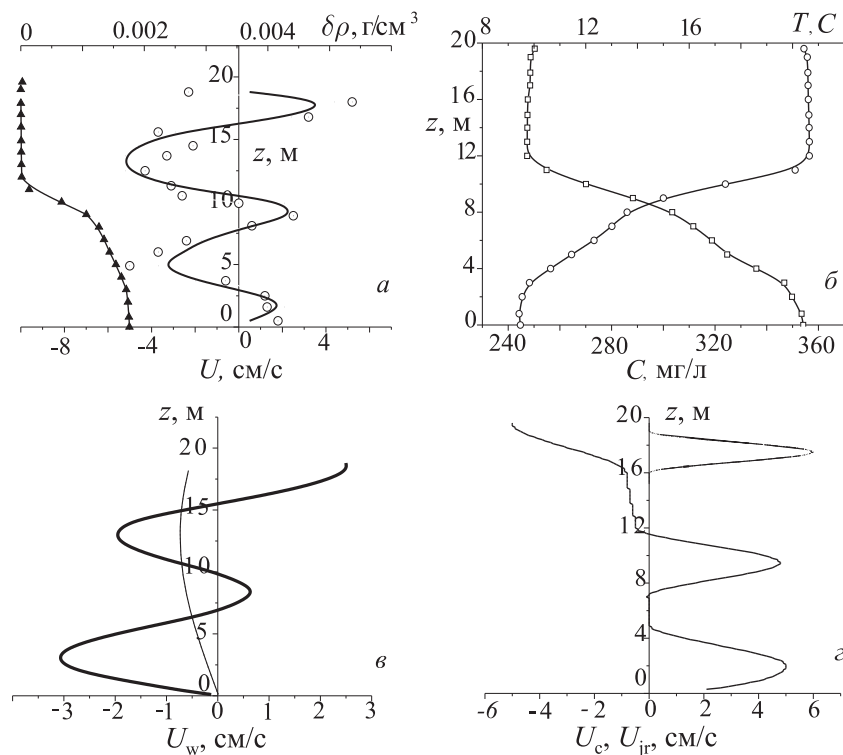


Рис. 2. Типичные профили: а — скорости  $U$  (точки — измеренные, сплошная линия — теоретические), роста плотности воды  $\delta\rho$  с глубиной (треугольники); б — температуры  $T$  (кружки) и концентрации растворенных солей  $C$  (квадраты); в — скорости внутренней волны  $U_w$  (жирная линия) и низшей моды сейши  $U_{ws}$  (тонкая линия); г — скорости циркуляционного течения  $U_c$  (жирная линия) и интрузии  $U_{jr}$  (тонкая линия)

Инtruзия в виде затопленной стратифицированной струи речных вод толщиной 1.5–6 м распространяется со скоростью  $U_{\text{г}} = 1\text{--}5$  см/с в интервале глубин 0–8 м (рис. 2, з).

Циркуляционное течение (рис. 2, з) содержит придонную, струйную и приповерхностную части. Толщина придонного циркуляционного потока  $z_u = 3\text{--}6$  м, его максимальная скорость  $U_m = 3\text{--}5$  см/с на высоте  $z_m = 2\text{--}4$  м. Струйная часть циркуляции располагалась в области термоклина, в слое толщиной 4–10 м, ее скорость по модулю составляла 3–6 см/с. Изменения знака скорости этой струи, зарегистрированные на плановой съемке, свидетельствуют о ее циркуляционной природе. Детальный анализ характера циркуляции требует более полной плановой съемки.

Приповерхностная часть характеризуется нелинейным ростом скорости от нуля на верхней границе придонного потока до значений у поверхности воды, достигавших 5 см/с (по модулю). Полный профиль скорости циркуляционного течения получался гладким сшиванием указанных частей по методике из [7].

Распределение скорости в горизонтальной плоскости на глубине 3 м характеризуется на разрезе течением с севера на юг, что согласуется с результатами расчетов методом полных потоков (рис. 1). В северо-восточной и северо-западной частях озера циркуляционное течение направлено по ветру, как и в [3]. В юго-западной части можно предположить существование локальной циркуляции (пунктир и векторы на рисунке). Эта циркуляция не

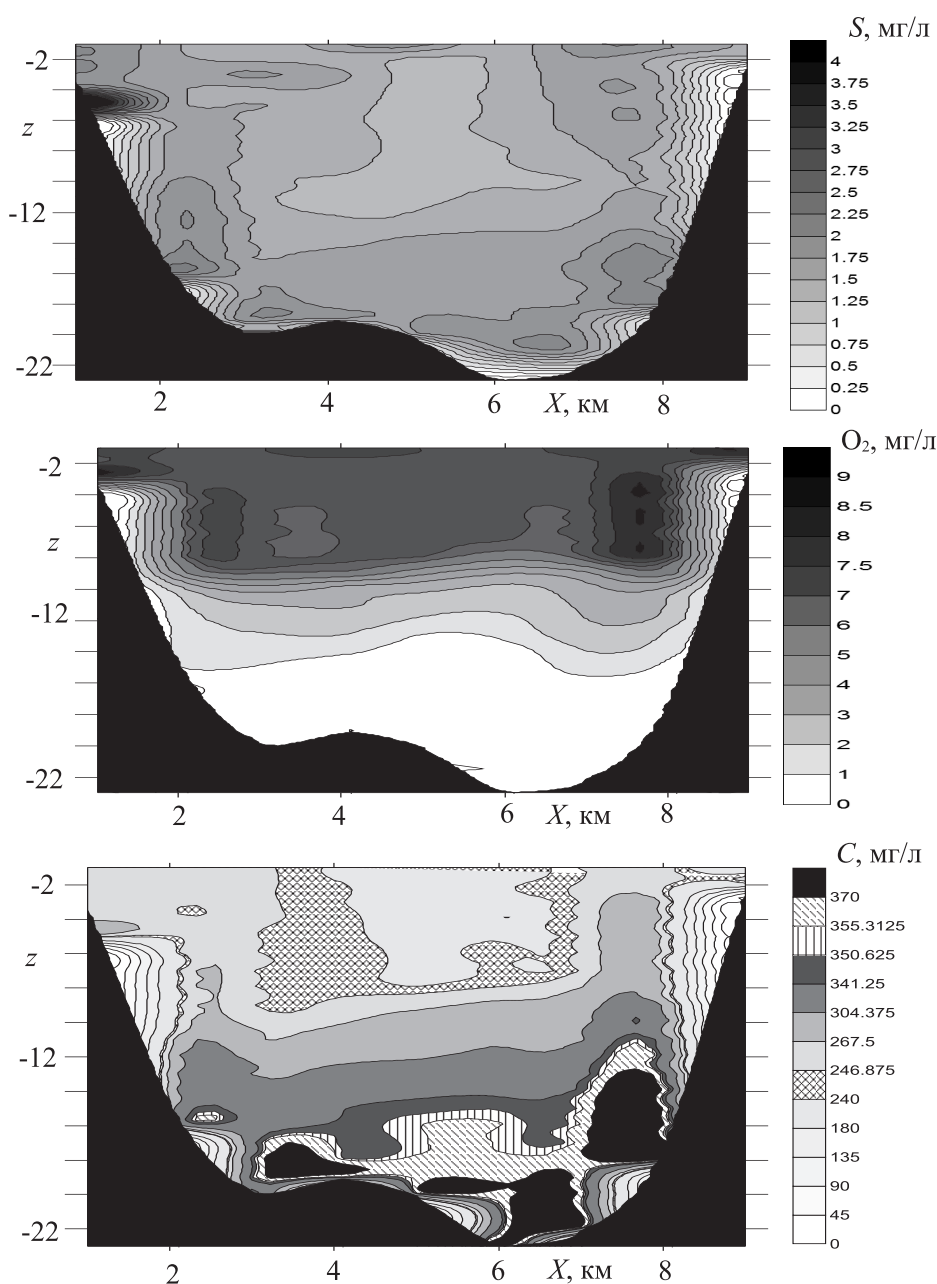


Рис. 3. Распределения концентрации взвеси  $S$ , растворенного кислорода  $O_2$  и минерализации  $C$  по глубине и длине водоема на продольно-осевом разрезе

рассчитывалась в [3], так как данное направление ветра не относится к типичным.

На распределениях концентрации взвеси, растворенного кислорода и минерализации по глубине и длине водоема на продольно-осевом разрезе (рис. 3) обнаружены области распространения взвесенесущей струи вод р. Трубеж, истока вод озера в р. Векса, зоны повышенной мутности на склонах в северной и южной частях озера, вызванные, по-видимому, стеканием вод со взвесью, поднятой со дна в результате ветрового взмучивания в прибрежной области. Этим зонам соответствуют повышенные значения минерализации, характерные для глубинных вод и речного притока. Колебания верхней границы придонного слоя с повышенной минерализацией связаны с аналогичными по фазе изменениями уровня максимума скорости придонного течения и амплитуды внутренней волны. Распределение растворенного кислорода над термоклином согласуется со структурами полей концентраций взвеси и растворенных солей. Под термоклином располагается анаэробная зона.

### 3. Интрузия речных вод

Затопленная струя вод р. Трубеж распространяется на расстояние до 4.5 км. Профиль скорости струи (рис. 2, в) сохраняет форму на всем ее пути. Концентрация взвеси в этом течении спадает с расстоянием от устья р. Трубеж на 20%, а при вычитании фонового значения концентрации в окружающих водах спад удельного содержания взвеси составляет 80%. Наблюдается пропорциональность избыточной концентрации взвешенных частиц и скорости струйного течения:

$$S_{jr} = S_{jr0} (U_{jr} / (U_{jr})_0). \quad (2)$$

Такая связь скорости и концентрации, характерная для мельчайших частиц взвеси, соответствует приближению подобия полей скорости и концентрации, которое обычно применяется в теории струй [8]. Исходя из этого приближения проведено сопоставление продольных распределений нормированных значений избыточной концентрации взвешенных частиц и скорости струйного течения (рис. 4, а). Полученная зависимость концентрации взвеси от скорости течения (рис. 4, а) аналогична зависимостям, наблюдавшимся нами в затопленных струях речных вод в Волховской губе Ладожского озера [7]. Обнаруженная пропорциональность удельного содержания взвеси и скорости струи в интрузии речных вод может использоваться для расчетов распределений концентрации взвесей в сходных течениях. Зоны действия струи и придонных мутьевых потоков под ней (рис. 3, а) совпадают с выделенными в работе [3] районами концентрации рыб в озере, что, по-видимому, обусловлено поступлением в интрузии питательных веществ, необходимых для развития биосферы озера.

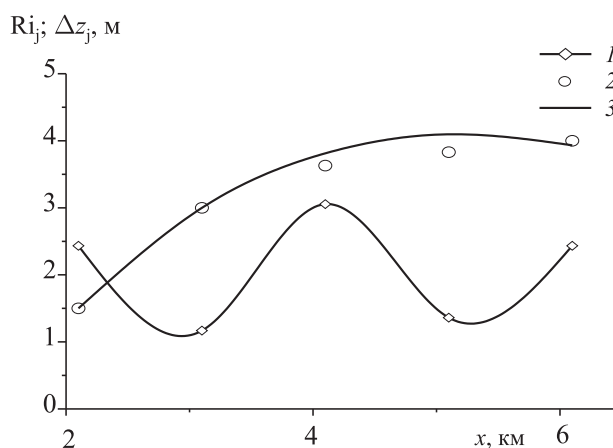
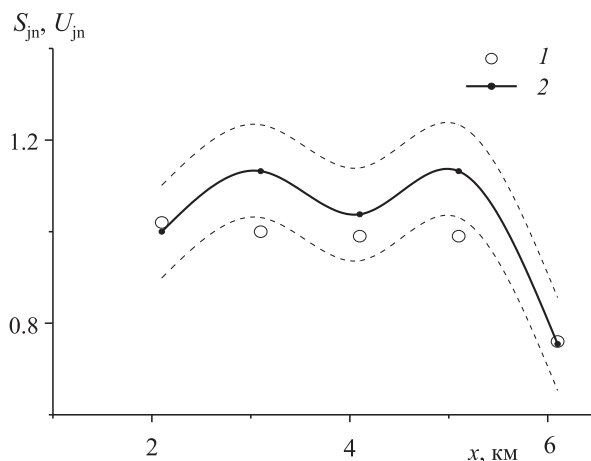


Рис. 4. а — Нормированные значения избыточной концентрации взвешенных частиц (1) и скорости струйного течения (2), б — зависимости гидродинамической устойчивости струи  $Ri_j$  (1) и толщины струи  $\Delta z_j$  (2 — измеренная, 3 — теоретический расчет) по длине водоема. Пунктир — стандартное отклонение

Толщина струи растет по мере ее распространения по закону, сходному с известным для гравитационных течений

$$\Delta z_j = \Delta z_{j0} + 0.4 \int_0^x i_{sj} dx, \quad (3)$$

где  $i_{sj}$  — уклон по траектории струи. Кривая на рис. 4, б построена по формуле (3).

Гидродинамическая устойчивость струи, оцененная по числу Ричардсона для нижней части течения из-за близости этого потока к поверхности, в целом сохраняется:  $Ri_j = 1.5-4.5$ . Здесь число Ричардсона определяется как интегральное по формуле

$$Ri_j = g \Delta \rho_j (\Delta \rho_j)_{low} / 2 \rho U_{mj}^2, \quad (4)$$

в которой  $(\Delta \rho_j)_{low}$  — разность плотностей воды в центре струи (на уровне максимума ее скорости) и на нижней границе этого течения,  $U_{mj}$  — максимальное на профиле значение скорости струи. Изменения устойчивости вдоль по течению обусловлены, по-видимому, влиянием внутренней волны с указанной выше длиной на струю.

## Закключение

1. Впервые выявлена по данным прямых измерений структура течений оз. Плещеево.
2. Получено и проверено по данным измерений теоретическое распределение скорости течения с учетом влияния внутренней волны, циркуляции и интрузии.
3. Выявлена затопленная струя речных вод в озере.
4. Получены измеренные и теоретические распределения концентрации взвеси в струе.
5. Установлено качественное соответствие полученных результатов с литературными данными о влиянии течений на биосферу озера.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00822а).

## Список литературы

1. Peeters F., Straile D., Lorke A., Ollinger D. // *Limnol. Oceanogr.* 2007. **52**, N 1. P. 286.
2. Serra T., Vidal J., Casamitjana X. // *Limnol. Oceanogr.* 2007. **52**, N 2. P. 620.
3. Поддубный С.А., Литвинов А.С. // Труды ИБВВ АН СССР. 1983. № 51 (54). С. 13.
4. Буторин Н.В., Скляренко В.Л. Экосистема озера Плещеева. Л., 1989.
5. Столбунова В.П. Зоопланктон озера Плещеево. М., 2006.
6. Самолубов Б.И., Иванова И.Н. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2014. № 5. С. 60. (Samolyubov B.I., Ivanova I.N. // *Moscow University Phys. Bull.* 2014. **69**, N 5. P. 426.)
7. Samolyubov B.I., Ivanova I.N. // *Physics of Wave Phenomena*. 2015. **23**, N 1. С. 76.
8. Самолубов Б.И. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2013. № 5. С. 91. (Samolyubov B.I. // *Moscow University Phys. Bull.* 2013. **68**, N 5. P. 431.)

## Circulation, internal wave, intrusion, and transfer of impurities in lake

**B. I. Samolyubov<sup>1,a</sup>, I. N. Ivanova<sup>1,b</sup>, A. A. Budnikov<sup>1</sup>, A. I. Tsvetkov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

<sup>2</sup> *Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl Region 152742, Russia.*

E-mail: <sup>a</sup> samolyubov@phys.msu.ru, <sup>b</sup> ivair@yandex.ru.

The results of structural hydrophysical investigations at the Pleshcheyevo Lake are presented. There were at first revealed on the base of the data of direct measurements the distributions of parameters of current velocity and of water composition in lake. The theoretical distribution of current velocity with taken into account the influence of internal wave, circulation and intrusion was verified. The submerged jet of the river water inflow in lake was discovered. There were obtained the measured and theoretical distributions of the total solids in jet. The quality corresponding between the obtained results and the materials of publications on the influence of currents on the biosphere of lake was established.

**Keywords:** stratified flows, internal waves, matter transport, intrusion.

PACS: 92.10.Lq, 92.10.Wa, 92.40.-t, 92.40.qj.

Received 22 June 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2015).

## Сведения об авторах

1. Самолубов Борис Исаевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-46, e-mail: samolyubov@phys.msu.ru.
2. Иванова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-46, e-mail: ivair@yandex.ru.
3. Будников Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-41-19, e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru.
4. Цветков Александр Игоревич — науч. сотрудник; тел.: (485 47) 241-24, e-mail: yarivers@gmail.com.