

УДК 556.16.048

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

С.А. Лебедев^{1,2}

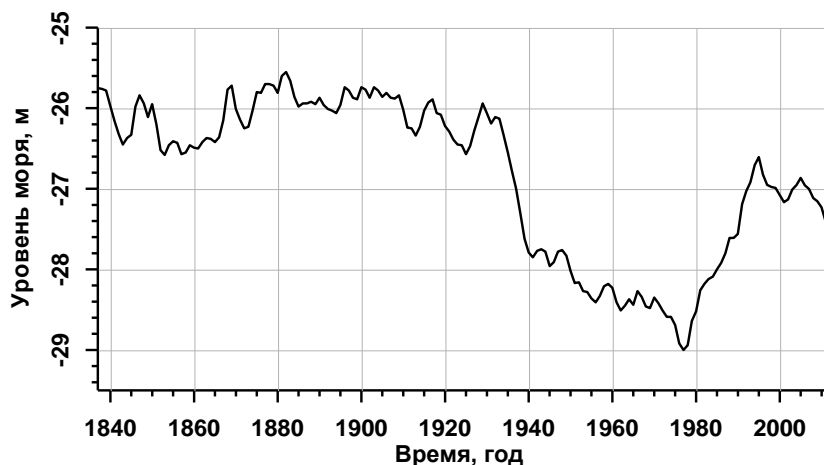
¹ Геофизический центра РАН, Москва

² Институт космических исследований РАН, Москва

Представлены результаты исследования пространственной неоднородности межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря на основе региональной модели средних высот морской поверхности. Показано, что можно выделить районы, в которых наблюдаются максимальные скорости изменения (падения или роста) уровня Каспийского моря. В первую очередь это район дельты реки Урал, район юго-восточнее Дербентской впадины и севернее Апшеронского порога, район побережья Азербайджана западнее Ленкоранской впадины.

Ключевые слова: Каспийское море, уровень моря, межгодовая изменчивость, пространственная неоднородность, дистанционное зондирование, спутниковая альтиметрия

В настоящее время большое внимание уделяется комплексному изучению Каспийского моря. И связано это не только с интенсивным развитием добычи нефти, но и с продолжающимися значительными колебаниями уровня Каспия. За время инструментальных наблюдений (с 1837 г.) амплитуда колебаний уровня Каспийского моря составила более 3 м (рис. 1).



Р и с. 1. Межгодовая изменчивость уровня Каспия за период инструментальных наблюдений с 1837 по 2012 гг.

За последние 25 лет значительно уменьшился объем регулярных гидрологических работ в море, а также объем информации с метеостанций и постов Гидрометслужбы. По сравнению с 1960 г. сеть метеостанций и уровенных постов на Каспии сократилась почти в 3 раза, а их техническое оснащение морально устарело. После распада СССР затруднен и обмен данными между государствами каспийского региона.

Уровенные посты проводят измерения вблизи береговой линии с разной точностью и временным разрешением в отсутствие единой высотной привязки. В большинстве случаев существенное влияние на точность измерений оказывают как особенности рельефа суши, так и очертания береговой линии. На точность измерений уровня также оказывают влияние современные вертикальные движения земной коры (СВДЗК) в каспийском регионе, которые вдоль побережья моря различаются не только по величине, но и по знаку. Это вносит значительную ошибку в расчеты межгодовой изменчивости уровня моря.

Использование спутниковой альтиметрии способно не только восполнить потерю традиционной информации, но и исследовать изменения уровня Каспийского моря на всей его акватории.

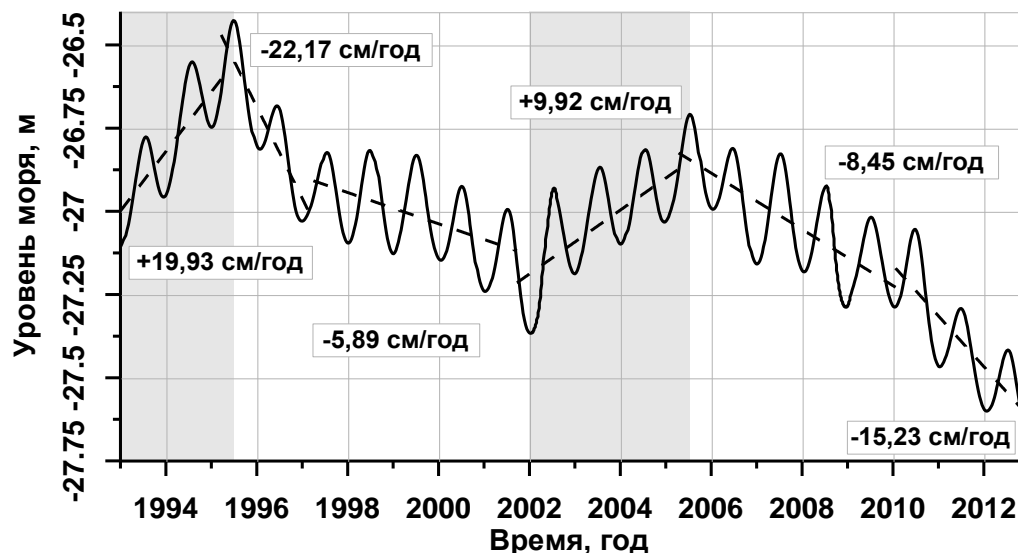
Основные преимущества зондирования подстилающей поверхности в микроволновом диапазоне связаны с высокой проникающей способностью радиоволн через атмосферу, в результате чего наблюдения могут проводиться в любое время суток, практически в любую погоду, при наличии в воздухе достаточно высоких концентраций аэрозолей. Это справедливо не только для спутниковой альтиметрии, но и для других активных методов дистанционного зондирования. Кроме этого, спутниковая альтиметрия позволяет измерять высоты морской поверхности относительно центра масс Земли, что дает возможность исключить СВДЗК из межгодового хода изменения уровня.

Для анализа гидрологического режима Каспия наиболее оптимальными являются данные спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason-1/2 (J1/2) [1, 2].

С сентября 1992 г. по настоящее время изменчивость уровня Каспийского моря хорошо прослеживается по данным спутниковой альтиметрии (рис. 2). Результаты расчетов показали, что этот временной период можно разделить на пять интервалов. С зимы 1992/1993 г. до лета 1995 г. наблюдался резкий рост уровня моря до отметки -26,4 м в балтийской системе со скоростью $19,93 \pm 2,14$ см/год. Затем до зимы 1997/1998 г. наблюдалось очередное резкое понижение до отметки -27,1 м со скоростью $22,17 \pm 2,45$ см/год. Умеренное падение продолжилось до зимы 2001/2002 г. до отметки -27,4 м со скоростью $5,89 \pm 1,09$ см/год. Последующий умеренный рост до отметки -26,7 м со скоростью $9,92 \pm 1,78$ см/год наблюдался до лета 2005 г. С лета 2005 г. по зиму

2009/2010 гг. уровень моря умеренно падал до отметки -27,3 м со скоростью $-8,45 \pm 1,23$ см/год. Это падение продолжилось и в 2010 г.

В 2010–2012 гг. скорость падения уровня Каспия увеличилась до $-15,23 \pm 1,73$ см/год; к марту 2013 г. уровень моря составил -27,6 м [3, 5, 6, 8].



Р и с. 2. Сезонная (сплошная линия) и межгодовая (штриховая линия) изменчивость уровня Каспия (м) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 с января 1993 г. по декабрь 2012 г. Периоды роста уровня выделены серым цветом

Анализ пространственной неоднородности межгодовой изменчивости Каспийского моря проводился по данным региональной модели средних высот морской поверхности (СВМП) Каспийского моря.

Сегодня существует множество глобальных моделей СВМП Мирового океана, в которые включена акватория Каспийского моря. Они отличаются друг от друга как данными, используемыми при расчетах (следовательно, и по временным интервалами осреднения), так и пространственным разрешением. Однако многие модели СВМП Мирового океана не включают акваторию Каспия. При вычислении СВМП всегда автоматически учитываются приливные поправки и/или поправки обратного барометра [2, 8]. Для Каспийского моря такой метод не подходит, поэтому необходимо создание региональной модели СВМП с учетом особенностей его гидрологического, гидрометеорологического и термогидродинамического режимов.

Исходя из определения СВМП как поверхности, наиболее приближенной к эквипотенциальной поверхности моря, региональная мо-

дель СВМП Каспийского моря вычислялась как функция не только широты и долготы, но и времени с фильтрацией сезонной и синоптической изменчивости высоты морской поверхности (ВМП). Для каждого года данные ВМП интерполировались на регулярную сетку методом разложения на радиальные базисные функции [4, 7].

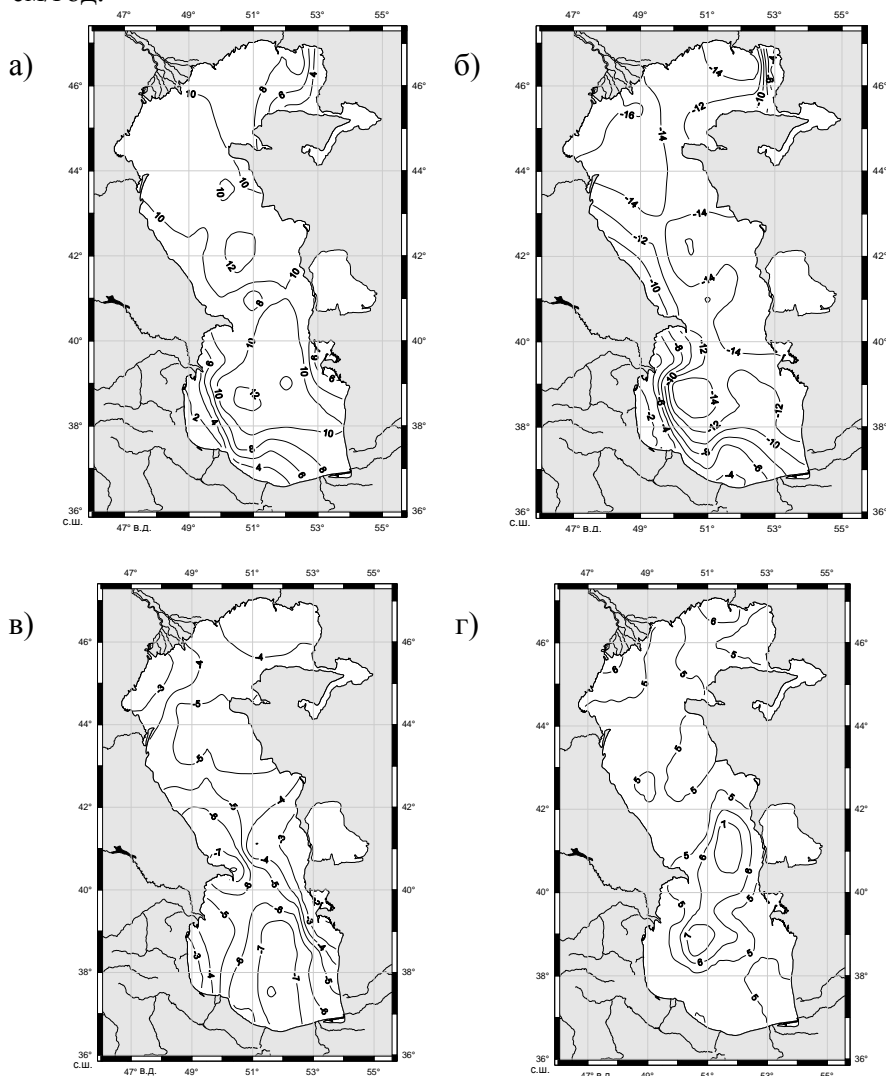
Анализ изменчивости СВМП для Каспийского моря показал, что уровень моря рос и падал неравномерно по акватории моря (рис. 3). В период с 1993 г. по 1995 г. максимальная скорость подъема уровня Каспийского моря более 20 см/год наблюдалась в районе Дербентской и Ленкоранской впадин (рис. 3а), а также в районе восточной части Апшеронского порога. Однако севернее него на свале глубин 200–300 м скорость роста не превышала 14–16 см/год. Аналогичная скорость подъема уровня Каспийского моря наблюдалась в районе пролива, соединяющего море с заливом Кара-Богаз-Гол. Столь малая скорость подъема уровня моря в этом районе объясняется тем фактом, что после взрыва плотины, отделяющей залив от моря в 1992 г., имел место процесс активного заполнения залива морской водой. Уровень залива в это время поднимался со скоростью $+168,5 \pm 5,23$ см/год [1, 2, 6, 8]. В восточной части Северного Каспия восточнее Уральской бороздины скорость подъема уровня в среднем составила $+6 - +14$ см/год, а в западной части дельты реки Волга и у побережья Калмыкии и Дагестана – более +18 см/год. Вдоль побережья Ирана и южного побережья Азербайджана скорость роста не превысила $+2 - +12$ см/год.

В период резкого падения уровня Каспия (1995–1997 гг.) максимальная скорость более -22 см/год также наблюдалась в районе Дербентской и Ленкоранской впадин (рис. 3б), восточной части Апшеронского порога и вдоль восточного побережья, отделяющего море от залива Кара-Богаз-Гол. Аналогичные скорости падения уровня наблюдались в западной части Северного Каспия и в его восточной части в районе Уральской бороздины. Вдоль побережья Ирана и южной части побережья Азербайджана скорость падения не превысила $-2 - -10$ см/год. Невысокие скорости снижения уровня моря наблюдались и у восточного побережья Северного Каспия ($-4 - -10$ см/год).

Для следующего временного интервала 1997–2001 гг., характеризующегося умеренным падением уровня Каспийского моря, пространственная неоднородность скорости изменения уровня показана на рисунке 3в. Скорость более -8 см/год наблюдается в северной части Апшеронского порога, а также вдоль всего побережья Апшеронского полуострова. В Южном Каспии восточнее Ленкоранской впадины на свале глубин 500–700 м наблюдается максимальная скорость падения уровня Каспийского моря (более -9 см/год). В восточной части Апшеронского порога скорость падения не превысила величину $-4 - -5$ см/год. Аналогичная скорость наблюдалась в Северном Каспии и вдоль южной части побережья Азербай-

джана. Минимального значения (менее -3 см/год) она достигла в Туркменском и Краснодарском заливах.

Следующий период умеренного роста уровня Каспийского моря (2001–2005 гг.) (рис. 3г) характеризуется скоростью подъема уровня более +12 см/год в районе Ленкоранской впадины и в северо-восточной части Среднего Каспия севернее Апшеронского порога. Большие скорости роста (+9 – +10 см/год) наблюдаются также в западной части Северного Каспия, прилегающей к дельте реки Волга, и в его восточной части. Вдоль побережья Азербайджана, Ирана и Туркменистана ее величина не превысила +7 – +8,5 см/год.

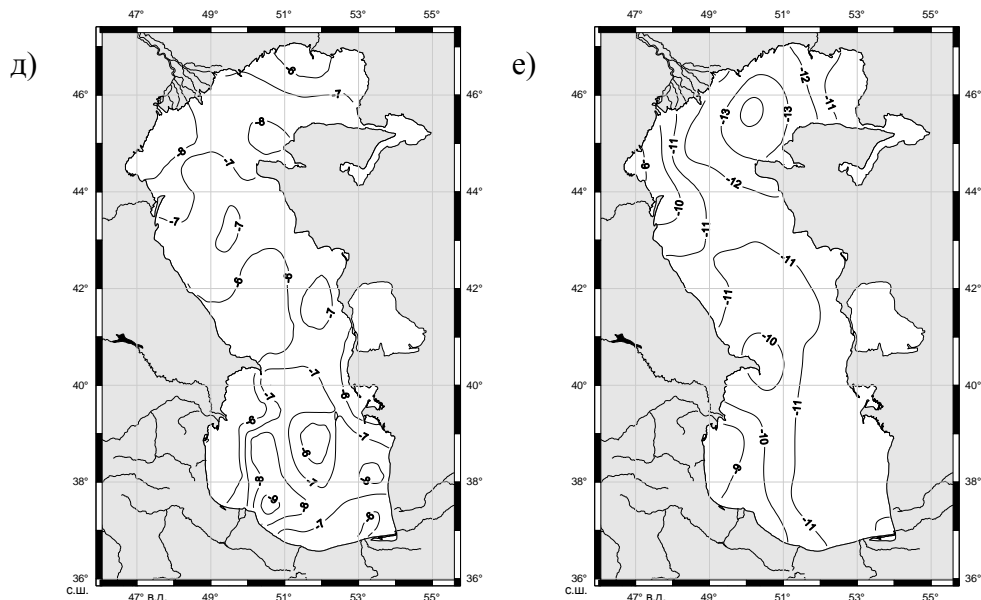


Р и с. 3. Карта межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря (см/год)

для шести периодов времени:

- (а) – сильное повышение (1993–1995 гг.),
- (б) – сильное падение (1995–1997 гг.)

- (в) – медленное падение (1997–2001 гг.),
- (г) – медленное повышение (2001–2005 гг.),
- (д) – медленное падение (2005–2009 гг.),
- (е) – сильное падение (2009–2012 гг.).



Р и с. 3. (Продолжение)

Наблюдающееся с 2006 г. по 2009 г. умеренное падение уровня Каспия (рис. 3д) также имеет неравномерное распределение величины скорости падения уровня моря. Максимальных значений (более -9 см/год) она достигает в Южном Каспии (на свале глубин более 700 м, юго-восточнее Апшеронского порога и западнее центральной части побережья Туркменистана) и в Северном Каспии в районе западной части дельты реки Волга и севернее Мангышлакского залива. В центральной части моря скорость падения уровня лежит в интервале от -7 до -8,5 см/год. По сравнению с предыдущими периодами падения уровня (1995–2001 гг.) скорость падения уровня вдоль побережья Ирана максимальна и составляет величину -7 – -9 см/год.

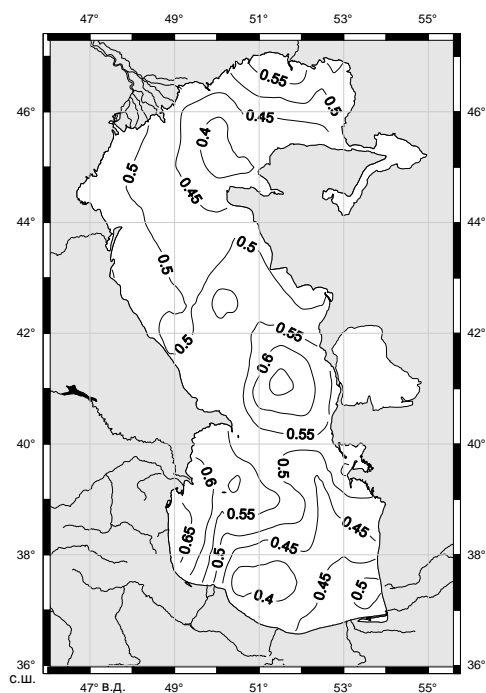
С 2009 г. по настоящее время наблюдается сильное падение уровня Каспия (рис. 3е). Максимальных значений (более -14 см/год) оно достигает в Северном Каспии (восточнее Уральской бороздины и севернее о. Кулалы). Минимальное значение (менее -9 см/год) наблюдается в северной части моря в Кизлярском заливе и в южной части вдоль южного побережья Азербайджана от Куринской косы и побережья провинции Гилян (Иран). В Среднем Каспии уровень падает в среднем со скоростью -11 см/год. Ло-

кальный минимум (менее -10 см/год) наблюдается на границе Северного и Южного Каспия вокруг Апшеронского полуострова. В Южном Каспии около побережья п-ова Мианкале – более -12 см/год. В среднем в этой части моря уровень падает со скоростью от -9 до -12 см/год.

Таким образом, можно выделить районы, в которых наблюдаются максимальные скорости изменения (падения или роста) уровня Каспийского моря (рис. 4). В первую очередь, это район дельты реки Урал, район юго-восточнее Дербентской впадины и севернее Апшеронского порога и район побережья Азербайджана западнее Ленкоранской впадины.

Полученные результаты показали, что скорость изменения высот морской поверхности Каспия (следовательно, и уровня моря) по его акватории имеет существенную пространственную изменчивость. Поэтому метод осреднения скорости роста и/или падения уровня Каспийского моря в целом по всей акватории или вдоль какого-либо трека альтиметрических измерений не применим. Необходимо районирование акватории моря по скоростям изменения уровня с целью улучшения понимания как особенностей гидрометеорологических условий различных частей акватории Каспия, так и создания методов физически обоснованных прогнозов его изменчивости в будущем.

Р и с. 4. Нормированные скорости изменения уровня Каспийского моря по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 с января 1993 г. по декабрь 2012 г.



Список литературы

1. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
2. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. – М.: Издательский центр «МОРЕ» Международного института океана. – 2005. – 366 с.
3. Лебедев С.А. Исследование межгодовой и сезонной изменчивости уровня Каспийского моря и уровня воды в реке Волга по данным альтиметрии спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2. – № 2. – С. 131–138.
4. Лебедев С.А. Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 224–234.
5. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Solovyov D.M. Satellite monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysh and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River // The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan / Eds. I.S. Zonn, A.G. Kostianoy. – Hdb. Env. Chem. V. 28. – Berlin, Heidelberg, New York. Springer-Verlag, 2014. – P 197–232. doi: 10.1007/698_2013_237.
6. Kouraev A.V., Cretaux J.-F., Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., Mamedov R., Zakharova E.A., Roblou L., Lyard F., Calmant S., Berge-Nguyen M. Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea // Coastal Altimetry / Eds. S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – P. 331–366. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_13.
7. Lebedev S.A. Mean Sea Surface Model of the Caspian Sea Based on TOPEX/Poseidon and Jason-1 Satellite Altimetry Data // Geodesy for Planet Earth / Eds. S. Kenyon et al. – IAG Geodesy Symposia. V. 136. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – P. 833–841. doi: 10.1007/978-3-642-20338-1_105.
8. Lebedev S.A., Kostianoy A.G. Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrologic and hydrodynamic regime of the Caspian Sea // Terr. Atmos. Ocean. Sci. – 2008. – V. 19. – № 1–2. – P. 71–82. doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.116(SA).

SPATIAL INHOMOGENEITY OF INTERANNUAL VARIABILITY OF THE CASPIAN SEA LEVEL BASED ON SATELLITE ALTIMETRY

S.A. Lebedev^{1,2}

¹ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

² Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

The results of the investigation of spatial inhomogeneity of the Caspian Sea level interannual variability on basis of the regional mean sea surface height model are presented. It is shown that is possible to identify areas of maximum rate of change (fall or rise) of the Caspian Sea. The first place is the zone of the Ural River delta, the zone between of south-east Derbent Depression and north of Apsheron Ridge, the zone between west part of Azerbaijan coastal zone and Lankaran Depression

Keywords: *The Caspian Sea, sea levels, interannual variability, spatial inhomogeneity, remote sensing, satellite altimetry*

Об авторе:

ЛЕБЕДЕВ Сергей Анатольевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Геофизический центр РАН, старший научный сотрудник, Институт космических исследований РАН, e-mail: lebedev@wdcb.ru

LEBEDEV Sergey Anatolievich – doctor of physical and mathematical sciences, senior research fellow, Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, senior research fellow, Space Research, e-mail: lebedev@wdcb.ru