

УДК 550.831.015: 550.831.23: 519.654

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЛЬТРАВЫСОКОСТЕПЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2021 г. В.Н. Конешов¹, П.С. Михайлов^{1,2}, В.Н. Соловьев¹, Л.К. Железняк¹

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Научно-технологический университет "Сириус", г. Сочи, Россия*

Автор для переписки: П.С. Михайлов (e-mail: paulmikh@mail.ru)

Рассматриваются вопросы моделирования гравитационного поля Земли, точности современных моделей и перспективность их дальнейшего развития. Изучены ультравысококачественные комбинированные модели и формирующие их составные части в разных частотных диапазонах. Основное внимание уделено спутниковым методам, составляющим низкочастотный базис комбинированной ультравысококачественной модели, и методу спутниковой альтиметрии, как наиболее эффективному средству получения высокочастотных данных о глобальном гравитационном поле на акваториях Мирового океана. Выявлены наиболее характерные области локализаций модельных погрешностей связанные с градиентом поля; предложен способ прогнозирования таких областей для предварительной оценки практического применения модельных данных. В результате анализа подтверждена перспективность моделирования глобального гравитационного поля на основе спутниковых методов и определены направления совершенствования методов создания перспективных комбинированных ультравысококачественных моделей.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, модель гравитационного поля Земли, сферические гармоники, аномалии силы тяжести, спутниковая гравиметрия, альтиметрия.

Введение

Возможности использования глобальных моделей гравитационного поля Земли в настоящее время очень широки. Заявленная разрешающая способность современных ультравысококачественных моделей со степенью разложения геопотенциала в 2190 и более коэффициентов позволяют решать фундаментальные, поисковые разведочные, а в перспективе еще и навигационные задачи. При разработке современных моделей авторы стремятся к максимально возможной достоверности данных по всему охвату модели. Однако современная ультравысококачественная модель представляет собой комбинированное решение, полученное с использованием разноточного набора данных из разных источников и, следовательно, содержит погрешности различной природы в аномалиях разных частотных диапазонов.

Оценки моделей, выполняемые разными исследователями (см., например, [Ненклонов, Максимова, Абакушина, 2016; Конешов и др., 2018; Jensen et al., 2019]), как правило, характеризуют общее качество высокостепенных модельных решений в интересующем регионе. Такие оценки показывают, что повышение степени разложения геопотенциала не всегда обеспечивает достоверность модельного поля. При рассмотрении вопроса перспективности современных моделей гравитационного поля целесообразно проанализировать развитие средств и методов, применяемых для получения данных в разных частотных компонентах, объединяемых в общее комбинированное решение, а также выделить и оценить наибольшие погрешности в каждой компоненте.

Источники данных и основные принципы создания моделей гравитационного поля Земли

Современная высокостепенная модель гравитационного поля – это сложная комбинация неравноточных данных, полученных различными средствами и методами, формирующих модель в разных частотных диапазонах спектра. С ростом инструментальной точности измерений, их методического и математического сопровождения расширяются возможности и разрешение каждого отдельного метода и повышается эффективность комбинирования их результатов. Типы данных, входящих в модель, их структура и метод объединения во многом определяют представительность модели и области ее возможного практического применения.

Метод спутниковой гравиметрии как основа создания глобальных моделей гравитационного поля Земли теоретически разрабатывался с 1950-х годов, а практически начал реализовываться в 1960-х годах с наступлением эры запусков искусственных спутников и наблюдения за их орбитальным движением. Так как гравитационное поле в первую очередь определяется формой земного геоида, возмущения в орбитальных элементах движущегося по орбите объекта являются следствием влияния гравитирующих масс, а минимальная величина возмущения характеризует длину волн аномалий и, следовательно, пространственное разрешение метода. Очевидно, что от точности слежения за объектом зависят точность реализации метода и детальность представления гравитационного поля.

Применяемые на начальном этапе такие методы слежения, как визуальное наблюдение с помощью баллистических камер и радиолокация по сети наземных станций определили необходимые для получения результата требования к типам и конфигурациям спутниковых орбит, на которые впоследствии были выведены первые специальные геофизические спутники (*GEOS I*, *GEOS II*, *LAGEOS* и др.). Первая модель *SE1*, построенная по данным наблюдений за движением этих спутников, была опубликована в 1966 г. и содержала сферические гармоники до 15-й степени разложения геопотенциала (≈ 1300 км). Список публикаций с описанием этой и всех последующих сферических моделей гравитационного поля Земли представлен на сайте Потсдамского Центра имени Гельмгольца (*GFZ*, Германия) http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime.

С ростом общего количества запусков и, как следствие, увеличения количества наблюдаемых объектов на разных орбитах, а также продолжительности слежения за ними, разрешение спутниковых моделей, получаемое по орбитальным измерениям, увеличилось до 99 гармоник геопотенциала, что примерно соответствует длине полуволны аномалии в 200 км (модель *GRIM5s1*, 1999 г.). Такая детальность была достигнута благодаря использованию французской системы радиолокации *DORIS*, использующей сеть наземных радиопередатчиков.

Дальнейшее увеличение разрешающей способности спутниковых моделей связано с ростом точности и надежности орбитального позиционирования средствами созвездия навигационных спутников *GPS* (*Global Position System*), расположенных на средних орбитах *MEO* (*Medium Earth Orbit*), и снижением высоты орбит специальных геофизических миссий. Обратная зависимость между высотами орбит гравиметрических спутников и разрешением публикуемых спутниковых моделей показана на рис. 1.

Снижение спутниковых орбит приводит не только к росту величины гравитационного возмущения, но и к появлению негравитационных инерционных ускорений, влияющих на движение спутника, в первую очередь атмосферного торможения, воздействие которого увеличивается экспоненциально с уменьшением высоты орбиты.

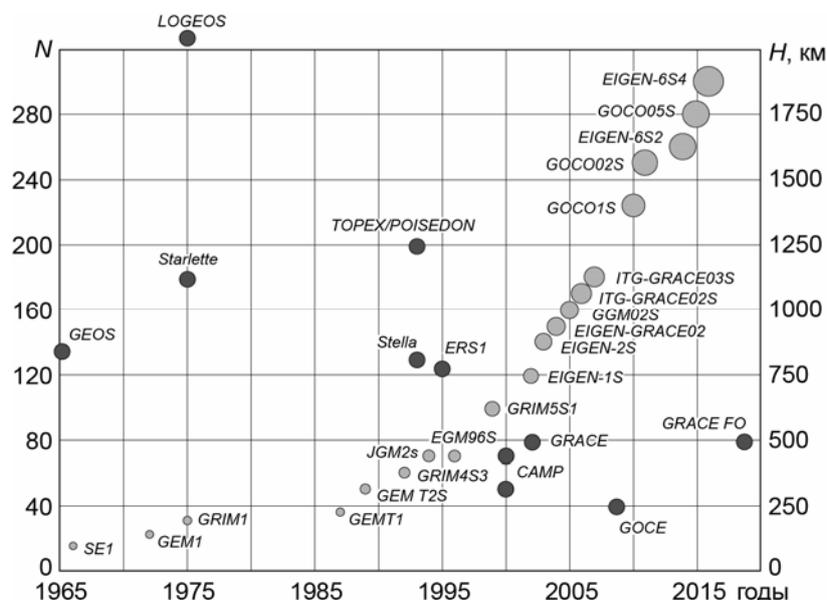


Рис. 1. Разрешение спутниковых моделей (светлые кружки, размер которых пропорционален количеству коэффициентов сферических гармоник N , шкала слева) и высоты орбит гравиметрических спутников и миссий (темные кружки, шкала справа). Сверху схематично обозначена орбита спутника *LOGEOS*, расположенная на высоте 5800 км

Fig. 1. Resolution of satellite models (light circles, their size is proportional to the number of spherical harmonic coefficients N , scale on the left) and orbital heights of gravimetric satellites and missions (dark circles, scale on the right). Above is schematically indicated the orbit of the *LOGEOS* satellite, which is located at an altitude of 5800 km

Для определения и учета негравитационных ускорений в наборное оборудование современных гравиметрических спутников входят трехосные акселерометры, показания которых учитываются при вычислении степеней коэффициентов гепотенциала. Кроме того, известно, что вторые производные гравитационного поля имеют высокую информативность и, следовательно, их прямые измерения непосредственно на орбите расширяют возможности вычисления короткопериодных аномалий по возмущениям орбиты, особенно в градиентных областях. Реализация межспутникового слежения “низкий–низкий” миссий *GRACE* и *GRACE-FO* и применение электростатического гравитационного градиентометра на основе системы из шести высокочувствительных акселерометров на борту миссии *GOCE* позволили увеличить разрешающую способность спутниковых моделей, построенных только по данным *GOCE*, до 330 гармоник, что соответствует вычисленным полуволнам аномалий в 60 км (модель *GO_CONS_GCF_2_SPW_R5*, 2017 г.).

Значительный прогресс в детальности вычисляемых спутниковых моделей был получен с началом использования *GPS* для слежения и позиционирования спутника. Точность определения высоты спутника на орбите возросла до нескольких сантиметров и можно предположить, что дальнейший качественный рост методов слежения уже не позволит на порядок улучшить разрешающую способность. Таким образом, наиболее перспективными направлениями спутниковой гравиметрии на сегодняшний день являются совершенствование методов градиентометрических измерений и снижение орбит новых гравиметрических миссий – различные орбитальные конфигурации межспутникового непрерывного взаимодействия и высокоточные градиентометры на еще более низколетящих спутниках.

Комплексная оценка высокостепенных моделей

Оценки региональной достоверности современных моделей гравитационного поля проводятся многими исследователями. Безусловно, такие работы представляют интерес для создания полной картины развития моделей и их практического применения. В первую очередь это собственные оценки разработчиков моделей, которые при публикации новой модели представляют сравнительные оценки с предыдущими аналогами. Среди последних моделей необходимо отметить работы создателей американских и датских альтиметрических моделей *SS* [Sandwell, Smith, 2009] и *DTU* [Andersen et al., 2019]. Данные аналитические сравнения демонстрируют развитие методов спутниковой гравиметрии и альтиметрии и показывают направленность разработчиков на совершенствование детальности и точности глобальных моделей гравитационного поля.

Независимые оценки компетентных пользователей моделей гравитационного поля являются эффективным инструментом для выявления модельных погрешностей. Наилучшим методом получения адекватных данных о точности и достоверности глобальных моделей является их сравнение с площадными морскими и аэрогравиметрическими съемками. Здесь необходимо отметить последние результаты исследований Датского технического университета и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН).

Оценки первых авторов показывают превосходство новой альтиметрической модели гравитационного поля *DTU17* над классической моделью *EGM2008* по результатам сравнения с аэрогравиметрической съемкой в проливе Каттегат [Jensen et al., 2019]. Стандартные отклонения составили 1.8 мГал для модели *DTU17* и 2.1 мГал для модели *EGM2008*, а максимальные отклонения достигали значений 10.2 мГал и 17.6 мГал для моделей *DTU17* и *EGM2008* соответственно.

С использованием материалов высокоточных морских площадных гравиметрических съемок, проведенных ИФЗ РАН в акваториях Северного Ледовитого и Индийского океанов, получены оценки точности и разрешающей способности трех ультравысокостепенных моделей (*EGM2008*, *EIGEN-6C4*, *GECO*) и предложены некоторые практические рекомендации по их использованию [Конешов и др., 2019]. Результатом этого изыскания является подтверждение взаимной сходимости трех популярных глобальных моделей при среднем значении отклонения в 0.03 мГал и максимальном стандартном отклонении в 2.19 мГал. Также в данной работе приведены среднее значение (1.60 мГал) и стандартное отклонение (4.72 мГал) модели *EGM2008* от морской гравиметрической съемки при максимальном отклонении до 38.36 мГал.

Представленные оценки моделей, выполненные исследователями в разных регионах и с использованием различных методов, демонстрируют глобальный рост точности модельных данных. При этом для комплексной оценки целесообразно дополнительно рассмотреть современные модели в срезе их составных частей и определить перспективы и направления развития, как отдельных составляющих, так и полных комбинированных решений.

Оценка спутниковых базисных моделей

В основе высокостепенного комбинированного решения, как правило, находится спутниковая базисная модель, полученная исключительно спутниковыми методами. Разрешающая способность таких моделей зависит от точности определяемого возмущения спутниковых орбит, продолжительности орбитальных наблюдений и точности учета негравитационных ускорений.

По результатам работы миссии *GOCE* разрешающая способность спутниковой модели достигла 330 гармоник (≈ 60 км), однако время нахождения миссии *GOCE* на достаточно низкой орбите высотой в 250 км, зависело от ресурса ионного двигателя, компенсирующего атмосферное торможение. Его выработка привела к завершению наиболее результативной геофизической спутниковой миссии.

Реализуемая в настоящее время миссия *GRACE-FO (Follow On)* практически повторяет конфигурацию предыдущей миссии *GRACE*. Одна из основных задач этой миссии – выявление глобальных вариаций гравитационного поля, но полученные при этом данные будут использоваться для уточнения аномалий поля и для вычисления новых улучшенных спутниковых моделей. Так как орбита пары спутников *GRACE-FO* выше, чем у спутника миссии *GOCE*, основным результатом ее работы будет не увеличение разрешения определяемых аномалий, а повышение качества данных за счет продолжительности наблюдений.

Для оценки достоверности современных спутниковых моделей в диапазоне полу-волн, соответствующих заявленному разрешению, проведено их сравнение с прямыми морскими гравиметрическими съемками, выполненными ИФЗ РАН. Для анализа были выбраны три современные и наиболее характерные спутниковые модели гравитационного поля.

1. Модель *ITG_Grace03*, опубликованная в 2007 г., содержит 180 коэффициентов гармоник поля. Эта модель построена по данным миссии *GRACE* и находится в основе первой ультравысокостепенной модели *EGM2008*.

2. Модель *GOCO06S*, созданная в 2019 г., содержит 300 коэффициентов гармоник поля. Данная модель, основанная на наблюдении девятнадцати спутников миссий *GOCE*, *GRACE*, *Swarm*, *TerraSAR-X*, *TanDEM-X*, *CHAMP*, а также наблюдениях за спутниками *LAGEOS*, *Starlette*, *Stella* и другими, согласно опубликованным данным, должна быть включена в ожидаемую перспективную ультравысокостепенную модель гравитационного поля *EGM2020*.

3. Модель *GO_CONS_GCF_2_SPW_R5* (далее *GO_GONS*) разработана в 2017 г. с учетом результатов миссии *GOCE* и содержит максимальную среди других спутниковых моделей степень разложения геопотенциала в 330 коэффициентов гармоник поля.

Для получения объективных статистических оценок, морская гравиметрическая съемка была отфильтрована низкочастотным фильтром со скользящим окном, ширина которого выбиралась в соответствии с разрешением каждой из перечисленных моделей: 111 км для модели *ITG_Grace03*, 66 км для модели *GOCO06S* и 60 км для модели *GO_GONS*. Результаты сравнения со съемкой, ограниченной до диапазона низких частот аномалий показаны в табл. 1 и на рис. 2. Для наглядности результатов в табл. 1 на примере модели *SSv28.1* также приведены статистические характеристики отклонений в высокочастотном диапазоне, полученные путем сопоставления модели и съемки без дополнительной фильтрации.

Таблица 1. Статистические характеристики расхождений между отфильтрованной съемкой и четырьмя рассматриваемыми моделями

Статистики расхождений	Съемка – модель (окно фильтрации съемки, км)			
	<i>ITG_Grace03</i> (111)	<i>GOCO06S</i> (66)	<i>GO_GONS</i> (60)	<i>SSv28.1</i> (без фильтрации)
Средний уровень, мГал	-9.37	-3.54	-3.97	-0.60
Максимум, мГал	25.30	12.59	17.11	17.79
Минимум, мГал	-69.20	-35.27	-33.10	-19.12
Стандартное отклонение, мГал	13.69	7.01	8.95	2.11

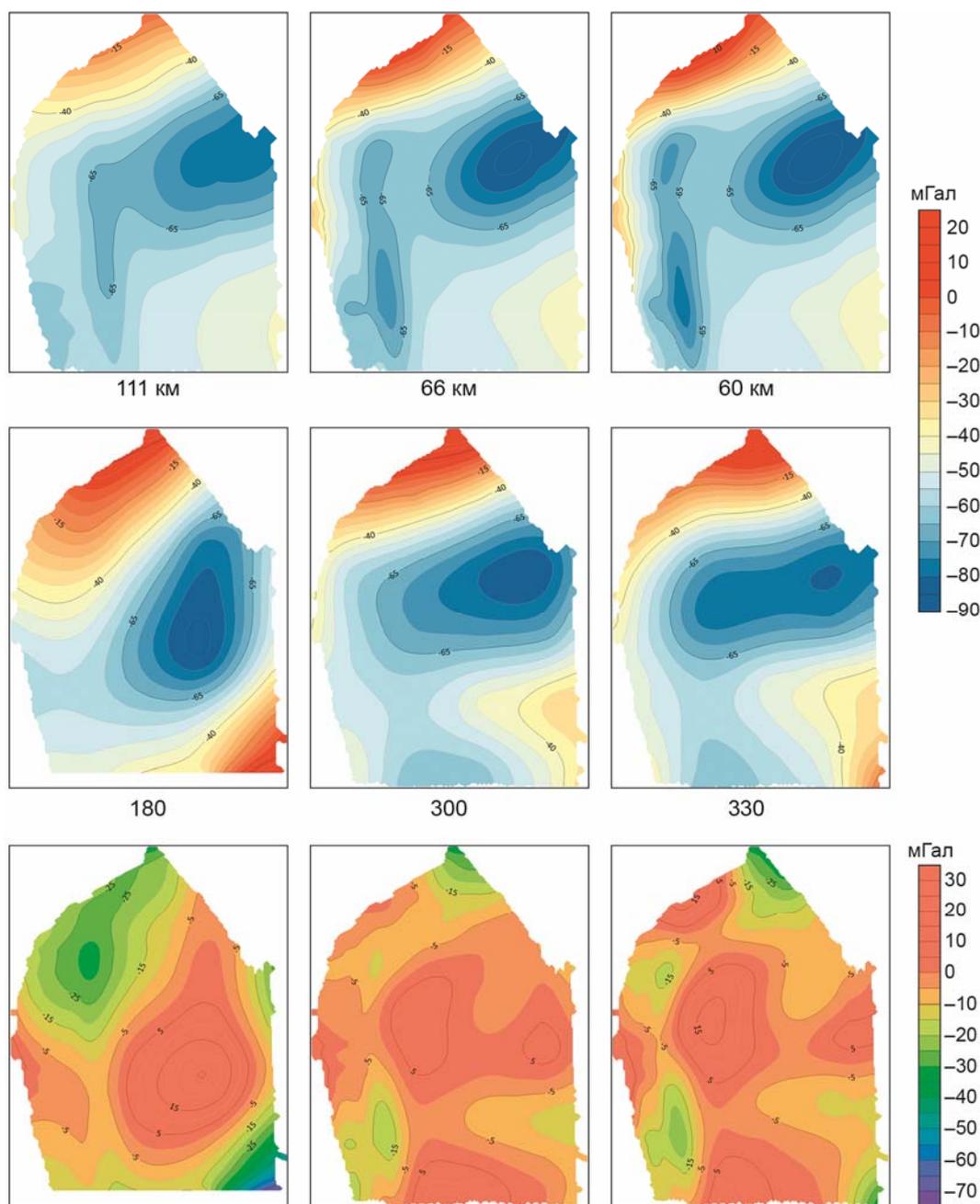


Рис. 2. Район Бенгальского залива. Сравнение высокоточной морской гравиметрической съемки, отфильтрованной низкочастотными фильтрами и спутниковых моделей (левый столбец – модель *ITG_Grace03*, столбец по центру – модель *GOCO06S*, правый столбец – модель *GO_CONS*) с соответствующим пространственным разрешением. Верхний ряд – фильтрация съемки с указанным окном, км; центральный ряд – поля представленных моделей с указанным числом гармоник; нижний ряд – карты разницы значений “съемка–модель”. Шаг изолиний – 5 мГал

Fig. 2. Area of the Bay of Bengal. Comparison of high-precision marine gravimetric survey, filtered by low-frequency filters and satellite models (left column – *ITG_Grace03* model, center column – *GOCO06S* model, right column – *GO_CONS* model) with the corresponding spatial resolution. Top row – filtration of the survey with the specified window, km; center row – fields of the presented models with the specified number of harmonics; bottom row – maps of difference between “survey – model” values. The step of all isolines is 5 mGal

Из табл. 1 следует, что статистические отклонения всех рассмотренных спутниковых моделей остаются значительными, особенно по сравнению с высокочастотной современной альтиметрической моделью, однако улучшение этих показателей в более современных моделях очевидно. Такие величины невязок объясняются тем, что спутниковые модели даже в 300 гармониках и выше представляют гравитационное поле только в соответствии с региональной формой геоида. Значительно гравитирующие элементы рельефа и волны, создаваемых ими аномалий, длины которых могут превышать пространственное разрешение спутниковых моделей, в этих моделях не представлены, т.е. еще не определяются однозначно спутниковыми методами.

В настоящее время спутниковые модели не являются самостоятельными продуктами для практического использования в отличие, например, от первых комбинированных моделей даже близкого к ним разрешения. Первой моделью, получившей практическое применение, была глобальная комбинированная модель *EGM96* с разрешением 360 гармоник.

Необходимо отметить непрерывный рост возможностей спутникового метода, связанный с реализацией геофизических спутниковых миссий и развитием измерительных инструментов на борту спутников. В период с 2017 по 2019 гг. успешно проведен эксперимент по выводу и удержанию на ультранизкой орбите (менее 200 км) японского спутника *SLATS (Super Low Altitude Test Satellite)*.

В перспективе низколетящие спутниковые платформы могут также применяться для определения параметров гравитационного поля с более высокой чувствительностью и, следовательно, для получения более достоверных спутниковых моделей в низких и средних частотах. При этом основная задача спутниковых моделей в настоящее время заключается в представлении глобальных и региональных особенностей геоида, и именно с такой целью они включаются в качестве базиса в высокостепенные комбинированные модели.

Альтиметрические погрешности в модельных данных

Наиболее эффективным средством изучения гравитационного поля в Мировом океане на сегодняшний момент является метод спутниковой альтиметрии, экспериментально примененный в 1974 г. Этот метод основан на высокоточном (до первых сантиметров) измерении положения невозмущенной поверхности океана и, как следствие, формы геоида. По высотам геоида вычисляется гравитационное поле в высоком разрешении, порядка 30 км. Рассматриваемый метод обеспечивает получение данных о глобальном гравитационном поле Мирового океана за исключением полярных областей, закрытых ледовым покровом. Впервые альтиметрия была использована при вычислении модели гравитационного поля *GEM10a* (1978 г., 30 гармоник), а включение альтиметрических данных в модель *EGM96*, позволило впервые решать с помощью этой модели некоторые глобальные практические задачи. Постоянный мониторинг поверхности океанов и морей начал выполняться в 1992 г. при реализации спутниковой программы *TOPEX/Poseidon* [Лебедев, 2013].

Современные спутниковые океанографические и климатические миссии *CryoSat-2*, *Jason-1*, *Envisat*, *Sentinel-3A*, *B* и другие, снабжены комплексом высокоточного измерительного оборудования, что способствует получению уточненных данных о топографии поверхности и режиме Мирового океана, а также внутренних морей и крупнейших озер. Эти данные позволили улучшить альтиметрические модели геопотенциала до пространственного разрешения в 7 км, при заявленной точности до 1 мГал. Наиболее известными глобальными моделями, построенными на основе альтиметрических

измерений, являются семейства комбинированных моделей *SS* Института океанографии Скрипса, Сан-Диего [Sandwell, Smith, 2009] и *DTU* Датского технического университета [Andersen et al., 2019].

Для изучения возможностей спутниковой альтиметрии при вычислении аномалий гравитационного поля на акваториях и оценки ее развития в период с 2008 по 2019 гг. было выполнено сравнение ультравысокостепенной модели *EGM2008* с наиболее актуальной версией модели *SSv.28.1*, опубликованной в 2019 г., а также с прямыми морскими съемками ИФЗ РАН. Результаты сравнения представлены на рис. 3 и в табл. 2.

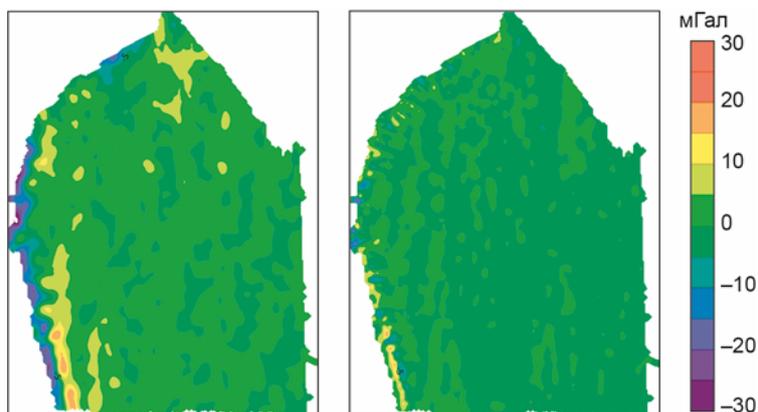


Рис. 3. Район Бенгальского залива. Сравнение модели *SSv28.1* с моделью *EGM2008* (слева) и с высокоточной морской съемкой (справа)

Fig. 3. Area of the Bay of Bengal. Comparison of *SSv28.1* model with *EGM2008* model (left) and with high-precision marine survey (right)

Таблица 2. Статистические характеристики расхождений между съемкой и ультравысокостепенными моделями

Статистики расхождений	Съемка – <i>EGM2008</i>	Съемка – <i>SSv28.1</i>	<i>SSv28.1</i> – <i>EGM2008</i>
Средний уровень, мГал	-1.49	-0.60	0.89
Максимум, мГал	41.87	17.79	32.28
Минимум, мГал	-25.24	-19.12	-19.56
Стандартное отклонение, мГал	4.76	2.11	4.07

Улучшение точности модельных данных в высокочастотном диапазоне напрямую связано с комплексным развитием метода спутниковой альтиметрии, включающем совершенствование измерительной аппаратуры, увеличение количества океанографических спутников и общего периода сбора данных, а также методов их обработки. Кроме того, для возможной предварительной оценки качества и достоверности модельных данных интерес представляет закономерность расположения погрешностей и их возможное априорное прогнозирование. В работе [Бехтерев и др., 2019] показана зависимость величины погрешностей аномалий в моделях гравитационного поля от морфологии дна океана, в первую очередь глубины. По результатам анализа более полумиллиона гравиметрических пунктов на десяти полигонах в Индийском океане авторами был сделан вывод, что погрешность моделей в шельфовых областях значительно выше, чем на абиссальных. Данный вывод подтверждается и в настоящем исследовании при сравнении модели *SSv28.1* (2019 г.) с моделью *EGM2008* (2008 г.) и с морской гравиметрической съемкой (области слева на обоих фрагментах рис. 3, являющиеся границей континентального склона и абиссальной равнины).

Рост точности самого метода альтиметрии, а также включение в набор исходных данных большего количества прямых съемок увеличило точность современной модели. Конечно, точность и разрешение модели не соответствуют прямым морским измерениям, но более актуальная модель уже может использоваться как инструмент оценки моделей предыдущего поколения (например, *EGM2008*) и наглядной демонстрации повышения точности моделирования гравитационного поля на акваториях Мирового океана.

Анализируя рис. 3, можно видеть, что области максимальных отклонений модели *EGM2008* от модели *SSv28.1* соответствуют локализации максимальных погрешностей самой модели *SSv28.1*. Таким образом, определены характерные участки, содержащие ошибки метода спутниковой альтиметрии. Эти ошибки уменьшаются с развитием прогресса в спутниковой океанографии, но все еще сильно заметны, а в наиболее современной модели *SSv28.1* достигают значений ± 19 мГал. В целях выделения пространственных закономерностей расположения модельных погрешностей были посчитаны карты вторых производных гравитационного поля и совмещены с картами межмодельной разницы “*SSv28.1 – EGM2008*” и разницы “Съемка – *SSv28.1*”. Полученные картограммы представлены на рис. 4.

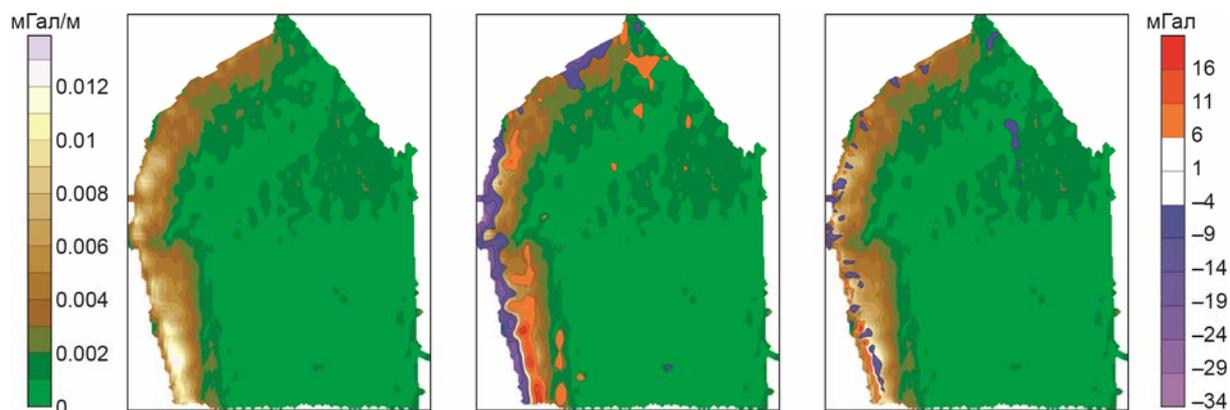


Рис. 4. Район Бенгальского залива. Слева – карта градиента гравитационного поля; в центре – та же карта, совмещенная с картой максимальных разностей “*SSv28.1 – EGM2008*”; справа – карта градиента гравитационного поля, совмещенная с картой максимальных разностей “Съемка – *SSv28.1*”

Fig. 4. Area of the Bay of Bengal. Left – map of the gravitational field gradient; in the center – the same map combined with the map of maximum differences “*SSv28.1 – EGM2008*”; right – map of the gravitational field gradient combined with the map of maximum differences “*Survey – SSv28.1*”

В процессе проведенного исследования установлено, что наибольшие погрешности обеих моделей в основном располагаются на градиентных участках поля. Более детальный анализ невязок, приведенный на рис. 5, показывает, что их величины с определенного градиента возрастают скачкообразно.

Как видно на графиках, пороговое значение результирующей от вторых производных, рассчитанных по направлению координатных осей, где резко возрастают фактические погрешности моделей, выросло с 0.0012 мГал/м для модели *EGM2008* до 0.0025 мГал/м для модели *SSv28.1*. Одной из причин этих погрешностей может быть срез фильтра при обработке альтиметрических данных. Согласно [Andersen et al., 2019] в альтиметрических измерениях присутствует шум, обусловленный как инструментальной погрешностью, так и рядом других факторов, в том числе ошибками моделирования прилива, определения спутниковых орбит и др.

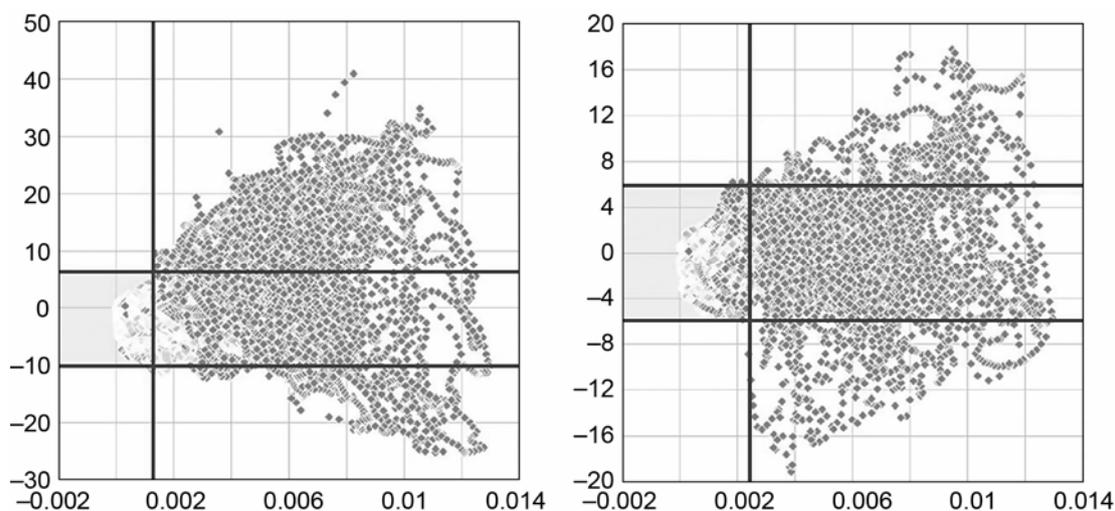


Рис. 5. Зависимость погрешности моделей *EGM2008* (слева) и *SSv28.1* (справа) от градиента фактического поля. На вертикальных осях – невязки “Съемка – *EGM2008*” (слева) и “Съемка – *SSv28.1*” (справа); на горизонтальных осях – градиент поля, мГал/м; вертикальная линия – пороговое значение градиента, при котором рост величин невязок происходит скачкообразно; горизонтальные линии – некоторый доверительный диапазон величин невязок; серым цветом отображена область наиболее достоверных данных

Fig. 5. Dependence of the error of models *EGM2008* (left) and *SSv28.1* (right) on the gradient of the actual field. On the vertical axes – residuals “Survey – *EGM2008*” (left) and “Survey – *SSv28.1*” (right); on horizontal axes – field gradient, mGal/m; the vertical line – the threshold value of the gradient, at which the increase in the values of the residuals occurs abruptly; horizontal lines – some confidence range of residual values; the area of the most reliable data is shown in gray

Разработчики альтиметрических моделей объединяют эту совокупность погрешностей в некоторый белый шум, который возрастает в процессе выполнения высокочастотной фильтрации при вычислении аномалий гравитационного поля. Для ограничения и сглаживания этого эффекта применяется специальный адаптивный фильтр, учитывающий спектральную плотность сигнала (метод Каула). В данном методе используется некоторый эмпирический параметр, настраиваемый по локальным характеристикам поля и высотам геоида. Подобный метод фильтрации не может быть универсальным и, как и любой фильтр, подавляет сигнал в наиболее градиентной зоне и на ее границах. Таким образом, повышение общей точности альтиметрического метода способствует уменьшению амплитуды белого шума, а значит и описанных погрешностей, что наглядно продемонстрировано в результате сравнения моделей *EGM2008* и *SSv28.1* (см. рис. 3).

Заключение

Рост разрешающей способности моделей гравитационного поля продолжается. Разрешение спутниковых моделей в 2017 г. достигло 330 гармоник поля или 60 км. В 2008 г. была опубликована первая наземно-спутниковая ультравысокостепенная модель *EGM2008* с разрешением 2190 гармоник или 10 км, а в 2019 г. экспериментальная сверх ультравысокостепенная модель *XGM2019* с заявленным разрешением до 5540 гармоник или 4 км. В модели *XGM2019* использованы данные наземной и спутниковой гравиметрии, а также топографии из модели рельефа *EARTH2014* на суше, а на океанах – спутниковой альтиметрии из модели *DTU13*. Объединение спутниковой информации

с прямыми инструментальными гравиметрическими измерениями было выполнено в пределах 719 степеней гармоник, а в более высоких частотах использовались исключительно данные топографии и альтиметрии. При этом модель *XGM2019* можно рассматривать именно как эксперимент по созданию модели со степенью коэффициентов разложения поля выше 2190. Сверхвысокое разрешение пока не подтверждается соответствующей достоверностью данных, поэтому создание подобных моделей в ближайшее время с практической стороны не целесообразно.

В 2015 г. было впервые объявлено о создании перспективной комплексной ультравысококачественной модели нового поколения *EGM2020*. На момент публикации модель еще не была доступна широкому кругу пользователей, но согласно официальным сообщениям разработчиков модель *EGM2020* будет создаваться на основании немецкой спутниковой модели *GOCO06S* и иметь степень коэффициентов разложения геопотенциала до 2190 при их порядке до 2159 [Barnes, 2019]. Высокочастотная часть данных будет дополнена большим количеством новых площадных и маршрутных инструментальных измерений. Также на акваториях Мирового океана и крупных внутренних водоемов в модели *EGM2020* планируется использовать комбинацию последних версий альтиметрических моделей *DTU* и *SS*. Таким образом, разработчики модели *EGM2020* стремятся увеличить не разрешающую способность, а достоверность данных. Это соответствует общей тенденции развития моделей гравитационного поля, направленной на улучшение данных в диапазоне до 2190 гармоники включительно, в то время как появление более детальных моделей с практическим функционалом в ближайшее время представляется маловероятным.

Настоящее исследование подтверждает выводы об улучшении достоверности и точности модельных данных гравитационного поля, особенно на акваториях Мирового океана. Наиболее перспективными современными моделями на сегодняшний день являются модели *SSv28.1* и *DTU17*, построенные с акцентом на методы обработки альтиметрических измерений. Эти модели демонстрируют лучшую сходимость с прямыми морскими и аэрогравиметрическими съемками и в дальнейшем планируются к включению в комбинированную модель следующего поколения *EGM2020*.

При сравнении моделей разных лет были определены характерные участки погрешностей, которые показывают также предполагаемое расположение погрешностей меньшего порядка, присутствующих в современной модели. Сравнительный анализ невязок между моделями совместно с картами вторых производных гравитационного поля может быть использован как один из инструментов априорной оценки модельного поля и картирования участков Мирового океана с наименее достоверными модельными данными, что очень актуально для решения многих практических задач.

Очевидно, что практическое применение моделей гравитационного поля расширяется с ростом их достоверности. Для повышения точности морской гравиметрической съемки в ИФЗ РАН разработан ряд методических приемов, предполагающих комплексный анализ съемочных данных совместно с данными глобальных моделей [Железняк и др., 2015] над абиссальными равнинами Мирового океана. Однако сравнительный анализ ультравысококачественных моделей показывает уменьшение погрешностей и в градиентных зонах, что в перспективе расширяет возможности подобных методов.

В качестве обобщенного результата этого и других описанных в статье исследований можно сделать основной вывод: с развитием средств и методов получения, математической обработки и комбинирования разнородной информации при моделировании гравитационного поля Земли увеличивается общая практическая применимость глобальных ультравысококачественных моделей и в этом заключается их основная перспективность и основное предназначение.

Финансирование

Исследование выполнено по государственному заданию Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 20-05-00524 и № 19-35-51014.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Бехтерев С.В., Дробышев М.Н., Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С., Соловьев В.Н.* Погрешности моделей гравитационного поля Земли в зависимости от морфологии рельефа дна океана // *Физика Земли*. 2019. № 5. С.118–122. DOI: 10.31857/S0002-333720195118-122
- Железняк Л.К., Конешов В.Н., Соловьев В.Н., Михайлов П.С.* Использование модели гравитационного поля земли при измерениях силы тяжести на море // *Физика Земли*. 2015. № 4. С.103–110. DOI: 10.7868/S0002333715040134
- Конешов В.Н., Крылов С.А., Логинов Д.С., Непоклонов В.Б.* Использование цифровых моделей аномалий силы тяжести для районирования гравитационного поля Земли // *Физика Земли*. 2018. № 6. С.170–176. DOI: 10.1134/S0002333718060078
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Соловьев В.Н., Железняк Л.К.* Сравнение современных глобальных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли // *Геофизические исследования*. 2019. Т. 20, № 1. С.13–26. DOI: 10.21455/gr2019.1-2
- Лебедев С.А.* Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 3. С.33–49.
- Непоклонов В.Б., Максимова М.В., Абакушина М.В.* Анализ динамики системы математических моделей гравитационного поля Земли // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2016. Т. 60, № 3. С.8–14.
- Andersen O., Knudsen P., Kenyon S., Holmes S., Factor J.K.* Evaluation of the Global Altimetric Marine Gravity Field DTU15: Using Marine Gravity and GOCE Satellite Gravity // *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World. International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Cham, 2019. V. 149. P.77–81. DOI: 10.1007/1345_2018_52
- Barnes D.E.* 2019 Updates Earth Gravitational Model 2020 // *American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts*. 2019. V. 2019. G33B-0669. Bibcode: 2019AGUFM.G33B0668B
- Jensen T., Olesen A., Forsberg R., Olsson P.-A., Josefsson O.* New Results from Strapdown Airborne Gravimetry Using Temperature Stabilisation // *Remote sensing*. 2019. V.11, N 2682. P.1–19. DOI: 10.3390/rs11222682
- Sandwell D.T., Smith W.H.F.* Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: ridge segmentation versus spreading rate // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2009. V. 114, B01411. P.1–18. DOI: 10.1029/2008JB006008

Сведения об авторах

КОНЕШОВ Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, научный руководитель направления, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

МИХАЙЛОВ Павел Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; научный исследователь, Научно-технологический университет “Сириус”. 354340, г. Сочи, Олимпийский проспект, д. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: paulmikh@mail.ru

СОЛОВЬЁВ Владимир Николаевич – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: solovyevvladimir318@mail.ru

ЖЕЛЕЗНЯК Леонид Кириллович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(496) 256-13-07. E-mail: zlkledovo@yandex.ru

EVALUATION OF THE PROSPECTS AND RESOLUTION OF GLOBAL ULTRA-HIGH-DEGREE MODELS OF THE EARTH'S GRAVITATIONAL FIELD

V.N. Koneshov¹, P.S. Mikhailov^{1,2}, V.N. Solovyev¹, L.K. Zheleznyak¹

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Sirius University of Science and Technology, Sochi, Russia*

Corresponding author: P.S. Mikhailov (e-mail: paulmikh@mail.ru)

Abstract. In this paper, the issues of modeling the Earth's gravitational field, the accuracy of modern models and the prospects for their further development are discussed. Ultra-high-degree combined models and their constituent parts that form these models in different frequency ranges were studied. The special attention is given to satellite methods that form the low-frequency basis of the combined ultra-high-degree model and to the satellite altimetry method, as the most effective means of obtaining high-frequency data on the global gravitational field in the waters of the World Ocean. The most typical areas of localization of model errors associated with the field gradient are identified and a method for predicting such areas for the preliminary assessment of the practical application of model data is proposed. Also, as a result of the analysis, the prospects of modeling the global gravity field on the basis of satellite methods were confirmed and directions for improving the methods for creating promising combined ultra-high-degree models were determined.

Keywords: Earth's gravitational field, Earth's gravitational field model, spherical harmonics, gravity anomalies, satellite gravimetry, altimetry.

Funding

The study was carried out as part of the State assignment of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, as well as with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of scientific projects no. 20-05-00524 and no. 19-35-51014.

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Andersen O., Knudsen P., Kenyon S., Holmes S., Factor J.K., Evaluation of the Global Altimetric Marine Gravity Field DTU15: Using Marine Gravity and GOCE Satellite Gravity, *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World. International Association of Geodesy Symposi*, Springer, Cham, 2019, vol. 149, pp. 77-81. DOI: 10.1007/1345_2018_52
- Barnes D.E., 2019 Updates Earth Gravitational Model 2020, *American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts*, 2019, vol. 2019, G33B-0669. Bibcode: 2019AGUFM.G33B0668B.

- Bekhterev S.V., Drobyshev M.N., Zheleznyak L.K., Koneshov V.N., Mikhailov P.S., Solovyev V.N., Errors of Earth gravity models as depending on seafloor morphology, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2019, no. 55, pp. 806-810. <https://doi.org/10.1134/S1069351319050021>
- Jensen T., Olesen A., Forsberg R., Olsson P.-A., Josefsson O., New Results from Strapdown Airborne Gravimetry Using Temperature Stabilisation, *Remote sensing*, 2019, vol. 11, no. 2682, pp. 1-19. DOI: 10.3390/rs11222682
- Koneshov V.N., Krylov S.A., Loginov D.S., Nepoklonov V.B., Using the digital models of gravity anomalies for zoning of the Earth's gravity field, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2018, vol. 54, no. 6, pp. 964-970. <https://doi.org/10.1134/S1069351318060071>
- Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Solovjev V.N., Zheleznyak L.K., Comparison of modern global ultra-high-grade models of the Earth gravitational field, *Geophysical Research*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 13-26. DOI: 10.21455/gr2019.1-2
- Lebedev S.A., Satellite altimetry in earth sciences, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (Modern problems of remote sensing of the Earth from space), 2013, vol. 10, no. 3, pp. 33-49. [in Russian].
- Nepoklonov V.B., Maximova M.V., Abakushina M.V., Analysis of the dynamics of the system of mathematical models of the Earth's gravitational field, *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"yemka* (Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying), 2016, no. 3, pp. 8-14. [in Russian].
- Sandwell D.T., Smith W.H.F., Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: ridge segmentation versus spreading rate, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, vol. 114, B01411, pp. 1-18. DOI: 10.1029/2008JB006008
- Zheleznyak L.K., Koneshov V.N., Mikhailov P.S., Solovyev V.N., Use of the Earth's gravitational model in marine gravity measurements, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 559-565. DOI: 10.7868/S0002333715040134

About the authors

KONESHOV Vyacheslav Nikolaevich – Dr. Sci. (Eng.), professor, academic adviser, head of the laboratory, leading researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-35. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

MIKHAILOV Pavel Sergeevich – Cand. Sci. (Eng.), Senior researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia; Scientific researcher, Sirius University of Science and Technology. Olympic Avenue 1, Sochi, 354340, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-35. E-mail: paulmikh@mail.ru

SOLOVYEV Vladimir Nikolevich – Senior researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-35. E-mail: solovyev@ifz.ru

ZHELEZNYAK Leonid Kirillovich – Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(496) 256-13-07. E-mail: zlkledovo@yandex.ru