

УДК 550.831.015: 550.831.23: 519.654

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПЕРЕХОДНЫХ РАЙОНАХ

© 2021 г. В.Н. Конешов¹, В.Б. Непоклонов^{1,2}, Е.С. Спиридонова²

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

² *Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Россия*
Автор для переписки: В.Н. Конешов (e-mail: slavakoneshov@hotmail.com)

Представлены методика сравнения глобальных моделей гравитационного поля Земли в виде разложения геопотенциала в ряд сферических гармоник и полученные в соответствии с ней новые экспериментальные данные, дополняющие и детализирующие сравнительные характеристики современных моделей с учетом их пространственной разрешающей способности. Особенность полученных авторами экспериментальных данных состоит в том, что они детально характеризуют как в статистическом смысле сходятся или различаются между собой исследуемые модели по значениям аномалий силы тяжести и уклонений отвесных линий в переходных районах от суши к морю (на примере контурных точек на всем протяжении береговой линии России). Рассматриваемые модели анализировались группами: в первую вошли восемь моделей сверхвысокого разрешения (до 1420–2190-го порядка разложения геопотенциала), во вторую – четырнадцать моделей высокого разрешения (до 360–720-го порядка разложения геопотенциала), включая четыре российские модели. В ходе исследования анализировались как внутригрупповые, так и межгрупповые различия. Полученные статистические характеристики районированы по одиннадцати окраинным морям – Черному, Балтийскому и от Белого до Японского моря. Установлено, что параметры внутригрупповых различий моделей высокого разрешения в целом в 1.5–2 раза больше аналогичных параметров моделей сверхвысокого разрешения. Показано, что в зависимости от изучаемого участка береговой линии наибольшие межгрупповые различия наблюдаются для районов Черного моря, дальневосточных морей (по контрасту) и арктических морей (по перепаду). Наибольшими внутригрупповыми различиями отличаются преимущественно зоны дальневосточных морей, центрального сектора Арктики, а также район Черного моря, но только для моделей высокого разрешения. Отмечены возможности использования разработанной методики для сравнительных исследований современных моделей гравитационного поля Земли в переходных районах.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, модель, аномалия силы тяжести, уклонение отвесной линии, переходный район, береговая линия, Россия, сравнительное исследование.

Введение

В настоящее время широкое распространение в геофизике, геодезии, баллистике и навигации получили глобальные модели аномального гравитационного поля Земли (ГПЗ) в виде сферических гармоник геопотенциала. В связи с повышением требований к точности и разрешающей способности моделей ГПЗ, с одной стороны, с ростом их количества, в том числе ультравысокостепенных моделей, с другой стороны, представляют интерес их сравнительные характеристики. Сравнительные исследования моделей ГПЗ проводятся как по всему земному шару в целом, так и по отдельным регионам (см., например, [Конешов и др., 2013, 2019; Канушин и др., 2015; Конешов, Непоклонов, 2018; Кащеев и др., 2020; Муравьев, 2019]). Для полноты картины сравнение моделей ГПЗ должно проводиться не только в континентальных и/или океанских районах, но и в так называемых переходных районах от океана к континентам. Интерес к этим районам обусловлен, в частности, тем, что при сравнительно низком уровне геофизической

изученности [Коротков, 2010] они характеризуются наличием существенных неоднородностей гравитационного поля и больших градиентов аномалий силы тяжести [Хмелевской, 1999], высокой сейсмичности, вулканизма и других опасных природных процессов [Родников и др., 2014]. Важным моментом при этом является установленное наличие в переходных зонах больших запасов углеводородного сырья [Верба и др., 2000]. Все это делает изучение физических полей Земли, включая гравитационное поле, в переходных районах актуальной задачей современной геофизики [Трофименко, 2011]. Тем не менее, до настоящего времени сравнительному анализу моделей ГПЗ в переходных районах не уделялось должного внимания. Отмеченные выше обстоятельства послужили предпосылкой для проведения исследований, основные результаты которых представлены в настоящей статье.

Постановка задачи, исходные данные и методика исследований

В геологическом смысле под переходным районом понимается область взаимопроникновения континентальных и океанских элементов рельефа и типов земной коры [Геологический ..., 1978]. В данной работе использовалась географическая интерпретация переходного района как полосы, окаймляющей с обеих сторон береговую линию (границу “суша–море”). Задача исследований, проводимых на примере Российской Федерации как приоритетного региона, сводилась к выяснению того, как и насколько сходятся или различаются между собой современные глобальные модели ГПЗ по границе “суша–море”.

Контурные точки береговой линии задавались с использованием географической базы данных *GSHHG* – совместного проекта Гавайского университета и Национального управления океанических и атмосферных исследований США [Wessel, Smith, 1996]. В зависимости от разрешения географические данные представлены в названной базе в пяти вариантах: грубое (*C*), низкое (*L*), среднее (*I*), высокое (*H*) и полное (*F*). Авторами предлагаемой работы использовалась модель среднего разрешения *GSHHG-I* (средняя дискретность на уровне единиц километров). Внешний контроль правильности отбора контурных точек проводился с привлечением глобальной цифровой модели высот рельефа и морских глубин *ETOPO01* ($1' \times 1'$) [Amante, Eakins, 2009].

Для удобства анализа и повышения информативности результатов изучаемый регион был разделен на три зоны: западную (*W*), северную (*N*) и восточную (*E*), а каждая из этих зон – на районы, соответствующие акваториям примыкающих морей. Таким образом было выполнено районирование береговой линии России по контурным точкам (табл. 1).

Модели сравнивались по трансформантам потенциала поля силы тяжести, которые обладают повышенной чувствительностью к локальным неоднородностям поля – аномалиям силы тяжести (Δg) и составляющим уклонения отвесной линии (УОЛ) в плоскости меридиана (ξ) и первого вертикала (η).

Модельные значения Δg , ξ , η вычислялись по формулам

$$\Delta g = \frac{fM}{r^2} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r}\right)^n (n-1) \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda), \quad (1)$$

$$\xi = -\frac{fM}{\gamma r^2} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n \frac{d\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)}{d\varphi} (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda), \quad (2)$$

$$\eta = -\frac{fM}{\gamma r^2 \cos \varphi} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n m \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) (\bar{S}_{nm} \cos m\lambda - \bar{C}_{nm} \sin m\lambda). \quad (3)$$

Таблица 1. Районирование контурных точек береговой линии России

Зона	Район (акватория)	Число контурных точек	
		По районам	Всего в зоне
Западная (<i>W</i>)	Азовско-Черноморский район (<i>W1</i>)	401	721
	Балтийское море (<i>W2</i>)	320	
Северная (<i>N</i>)	Белое море (<i>N1</i>)	1176	13780
	Баренцево море (<i>N2</i>)	3078	
	Карское море (<i>N3</i>)	4487	
	Море Лаптевых (<i>N4</i>)	3504	
	Восточно-Сибирское море (<i>N5</i>)	1219	
	Чукотское море (<i>N6</i>)	316	
Восточная (<i>E</i>)	Берингово море (<i>E1</i>)	918	3469
	Охотское море (<i>E2</i>)	2202	
	Японское море (<i>E3</i>)	349	
Общее число точек: 17970			

В формулах (1)–(3) a – большая полуось общеземного эллипсоида; φ , λ , r – сферические геоцентрические координаты (широта, долгота, радиус-вектор) расчетной точки; fM – произведение гравитационной постоянной на массу Земли; \bar{P}_{nm} – функции Лежандра (нормированные), определяемые на основе рекуррентных соотношений; \bar{C}_{nm} , \bar{S}_{nm} – гармонические коэффициенты аномального геопотенциала (нормированные); γ – нормальное ускорение силы тяжести в расчетной точке [Мориц, 1983].

Известно, что современные модели ГПЗ существенно различаются по их разрешающей способности, показателем которой служит наименьшая из учитываемых моделью волн геоида, определяемая как

$$\lambda = \frac{2\pi R}{N} \approx \frac{40000}{N}, \quad (4)$$

где R – радиус геосферы, км; N – степенной предел представленных в модели сферических гармоник геопотенциала [Li, Götze, 2001]. Формально чем больше N , тем меньше λ и, соответственно, выше разрешающая способность моделей ГПЗ.

В зависимости от значения N различают несколько классов моделей: при $N \leq 300$ модели относятся к моделям низкого и среднего разрешения; при $300 < N \leq 720$ – к моделям высокого разрешения (высокостепенные); при $N > 720$ – к моделям сверхвысокого разрешения (ультравысокостепенные) [Конешов и др., 2020]. Поскольку с уменьшением значения N погрешности учета локальных неоднородностей ГПЗ возрастают, авторами данной работы рассматривались только опубликованные не ранее 1996 г. модели двух классов – высокостепенные и ультравысокостепенные. Отсчет велся от модели *EGM96* ($N=360$), которая официально принята в систему геодезических параметров *WGS-84* и в определенной мере положила начало современному этапу изучения глобального ГПЗ на основе комплексного использования разнородной информации.

Всего для проведения исследования было отобрано 22 глобальных модели гравитационного поля Земли [International ..., 2021; Демьянов и др., 1999; Демьянов, Сермягин, 2009; Параметры ..., 2020], включая четыре российские. Из этих моделей были сформированы три группы (табл. 2). Группа M_1 включала восемь моделей сверхвысокого разрешения; в группу M_2 в полном составе вошли 14 моделей высокого разрешения; в группе M_3 были представлены только зарубежные модели высокого разрешения (десять моделей).

Таблица 2. Состав исследуемых глобальных моделей гравитационного поля Земли

Группа	Класс модели	Наименование модели	N	Год выпуска
M_1	Модели сверхвысокого разрешения	<i>EGM2008</i>	2190	2008
		<i>EIGEN6C</i>	1420	2011
		<i>EIGEN6C2</i>	1949	2012
		<i>EIGEN6C3</i>	1949	2014
		<i>EIGEN6C4</i>	2190	2014
		<i>GECO</i>	2190	2015
		<i>SGG-UGM-1</i>	2159	2018
		<i>XGM2019</i>	2190	2019
		<i>EGM2008</i>	2190	2008
M_2	Модели высокого разрешения	Зарубежные модели		
		<i>EGM96</i>	360	1996
		<i>EIGEN-CG01C</i>	360	2004
		<i>EIGEN-CG03C</i>	360	2005
		<i>EIGEN-GLOC4</i>	360	2006
		<i>GGM03C</i>	360	2007
		<i>EIGEN-5C</i>	360	2008
		<i>GIF48</i>	360	2011
		<i>GGM05C</i>	360	2015
		<i>GOCO05C</i>	720	2016
		<i>XGM2016</i>	719	2016
		Российские модели		
		ГАО98	360	1998
		ПЗ90.02/360	360	2002
		ГАО2008	360	2008
		ГАО2012	360	2012
M_3	Модели высокого разрешения	Только зарубежные модели высокого разрешения, указанные в таблице выше		

Методика исследования на начальном этапе предусматривала вычисление значений Δg , ξ , η в каждой контурной точке каждого из одиннадцати районов, указанных в табл. 1; вычисления выполнялись по каждой из 22 моделей, представленных в табл. 2. Расчеты проводились в соответствии с формулами (1)–(3) в системе *WGS-84* на поверхности отсчетного эллипсоида. В результате, для каждой контурной точки P_{ij} был получен набор модельных значений АСТ $\Delta g(P_{ij}, M_{kl})$ и составляющих УОЛ $\xi(P_{ij}, M_{kl})$, $\eta(P_{ij}, M_{kl})$, где i – номер участка ($i=1, 2, \dots, 11$); j – номер контурной точки данного участка; M_{kl} – модель с номером l в группе M_k ($k=1, 2, 3$).

Для оценки внутригрупповых различий представляемая методика анализа предусматривала следующие процедуры:

- вычисление первичных показателей внутригруппового различия – стандартных отклонений $\sigma_{\Delta g}(P_{ij}, M_k)$, $\sigma_{\xi}(P_{ij}, M_k)$, $\sigma_{\eta}(P_{ij}, M_k)$ и модельных значений АСТ и составляющих УОЛ для моделей одной группы M_k ($k=1, 2, 3$) в каждой отдельно взятой точке P_{ij} ;
- получение интегральных характеристик внутригруппового различия – средней величины $\mu_{\sigma}(P_i, M_k)$, медианы $m_{\sigma}(P_i, M_k)$ и размаха $R_{\sigma}(P_i, M_k)$ одноименных первичных показателей $\sigma_{\Delta g}$, σ_{ξ} , σ_{η} для каждой группы моделей M_k ($k=1, 2, 3$) по каждому отдельно взятому участку P_i .

Получаемая величина μ_σ определяет средний контраст расхождений между одноименными модельными значениями Δg , ξ , η (в усредненном смысле), а R_σ – диапазон изменения значений $\sigma_{\Delta g}$, σ_ξ , σ_η на множестве контурных точек для моделей одной группы. Медиана m_σ , точнее, разность $m_\sigma - \mu_\sigma$ может служить характеристикой асимметрии распределения точечных значений $\sigma_{\Delta g}$, σ_ξ , σ_η .

Методика оценки межгрупповых различий включала:

– вычисление для каждой группы моделей M_k ($k=1, 2, 3$) и каждой точки P_{ij} среднегрупповых значений АСТ и составляющих УОЛ по формуле

$$\{\overline{\Delta g}_k, \overline{\xi}_k, \overline{\eta}_k\}(P_{ij}) = \frac{1}{N_k} \sum_{l=1}^{N_k} \{\Delta g, \xi, \eta\}(P_{ij}, M_{kl}), \quad (5)$$

в которой N_k – число моделей в группе M_k ($k=1, 2, 3$);

– получение первичных показателей межгруппового различия – расхождений между полученными одноименными среднегрупповыми значениями (5) для разных групп моделей, т.е. парных межгрупповых разностей для каждой точки P_{ij} :

$$\{\delta g_{kk'}, \delta \xi_{kk'}, \delta \eta_{kk'}\}(P_{ij}) = \{\overline{\Delta g}_k - \overline{\Delta g}_{k'}, \overline{\xi}_k - \overline{\xi}_{k'}, \overline{\eta}_k - \overline{\eta}_{k'}\}(P_{ij}), \quad (6)$$

где k и k' – номера сравниваемых групп моделей M_k и $M_{k'}$, в данном случае $k=1, k'=2, 3$;

– получение интегральных характеристик межгруппового различия – средней величины $\mu_\sigma(P_i, M_1, M_{k'})$, медианы $m_\sigma(P_i, M_1, M_{k'})$, стандартного отклонения $\sigma_\delta(P_i, M_1, M_{k'})$ и размаха $R_\sigma(P_i, M_1, M_{k'})$ первичных показателей межгруппового различия (6) по каждому отдельно взятому району P_i .

Величины μ_σ , σ_δ и R_σ определяют, соответственно, систематическую составляющую, контрастность и диапазон изменения расхождений (6) между усредненными по группам M_1 , M_2 и M_3 модельными значениями АСТ и составляющих УОЛ в одних и тех же контурных точках изучаемого района. Медиана m_σ , как и для внутригрупповых различий, является характеристикой асимметрии, в данном случае – асимметрии распределения межгрупповых расхождений (6).

Дополнительно проводилась оценка статистической значимости межгрупповых различий по районам P_i с использованием одномерного (однофакторного) дисперсионного анализа. Решение о значимости различия принималось по выборочным значениям критерия Фишера (F) при уровне значимости $\alpha=0.05$, которому в зависимости от количества контурных точек в районе соответствуют пороговые значения F_0 , находящиеся в интервале от 3.84 до 3.86.

Сравнительное исследование моделей ГПЗ по описанной методике проводилось с использованием экспериментального комплекса вычислительных программ, разработанного авторами для ее реализации.

Результаты и их обсуждение

Полученные в данной работе численные оценки интегральных показателей внутригрупповых различий между моделями ГПЗ μ_σ , m_σ и R_σ (табл. 3) показывают, что внутригрупповые различия моделей ГПЗ в контурных точках могут существенно меняться как в зависимости от группы, так и в зависимости от рассматриваемого района.

Таблица 3. Оценки внутригрупповых различий между моделями ГПЗ

Район	M_1			M_2			M_3		
	μ_{δ}	m_{δ}	R_{δ}	μ_{δ}	m_{δ}	R_{δ}	μ_{δ}	m_{δ}	R_{δ}
Аномалия силы тяжести (Δg , мГал)									
W1	2.17	1.92	9.60	11.65	9.08	20.20	6.97	5.51	20.68
W2	2.56	2.36	7.52	5.91	6.64	8.78	3.26	3.25	4.20
N1	4.66	4.15	13.81	5.14	4.44	16.05	3.19	2.80	8.38
N2	6.20	5.36	33.67	8.03	7.71	20.87	5.46	5.10	13.19
N3	6.00	5.23	45.00	5.44	4.84	21.17	4.35	3.80	23.55
N4	6.79	6.01	25.32	5.24	4.87	10.75	4.47	4.08	11.80
N5	5.30	4.67	17.22	4.19	3.69	8.80	3.73	3.45	8.90
N6	5.05	4.59	15.10	5.20	4.26	11.05	3.33	2.88	5.40
E1	3.95	3.72	14.70	14.40	12.44	47.41	10.70	8.53	37.15
E2	3.65	3.20	12.43	8.46	7.22	36.94	7.47	6.17	41.56
E3	4.46	3.54	15.01	11.41	11.04	19.05	10.66	10.05	15.29
Составляющая УОЛ в меридиане (ξ , ")									
W1	0.31	0.27	1.33	1.80	1.54	4.70	1.27	0.99	3.76
W2	0.40	0.36	1.15	0.66	0.63	0.85	0.43	0.40	0.60
N1	0.77	0.72	2.31	0.75	0.72	1.72	0.57	0.53	1.47
N2	0.98	0.83	6.84	1.38	1.28	3.25	0.87	0.85	2.06
N3	1.01	0.89	6.62	1.05	0.89	3.30	0.79	0.68	2.98
N4	1.20	1.04	3.76	1.22	1.08	3.80	1.22	1.07	4.65
N5	0.73	0.62	2.80	0.65	0.60	1.63	0.56	0.54	1.82
N6	0.61	0.54	1.57	0.76	0.69	1.54	0.59	0.51	1.70
E1	0.60	0.56	2.15	2.11	1.87	6.16	1.53	1.27	5.21
E2	0.54	0.49	2.14	1.11	1.00	3.42	0.98	0.86	4.16
E3	0.82	0.62	3.20	2.16	1.87	3.33	1.48	1.47	3.13
Составляющая УОЛ в первом вертикале (η , ")									
W1	0.30	0.27	1.10	1.09	0.95	3.34	0.82	0.62	3.57
W2	0.54	0.46	1.20	0.68	0.62	1.09	0.45	0.44	0.57
N1	0.71	0.63	2.20	0.57	0.48	1.51	0.43	0.34	1.24
N2	0.92	0.81	6.73	1.55	1.21	4.15	0.81	0.74	2.41
N3	0.77	0.66	6.76	1.04	0.80	4.20	0.61	0.48	2.78
N4	0.78	0.72	2.53	0.86	0.84	1.63	0.77	0.69	1.67
N5	0.75	0.63	2.99	0.61	0.56	1.33	0.50	0.44	1.47
N6	0.84	0.70	2.50	0.64	0.61	0.97	0.47	0.44	0.72
E1	0.65	0.58	2.55	2.06	1.84	6.31	1.32	1.14	3.42
E2	0.55	0.48	2.03	1.22	1.09	4.20	1.07	0.90	4.12
E3	0.61	0.55	1.78	1.48	1.51	1.67	1.32	1.40	2.02

Согласно табл. 3, интегральные показатели внутригрупповых различий варьируют в пределах (соответственно):

а) $\mu_{\sigma}(P_i, M_1)$, $\mu_{\sigma}(P_i, M_2)$ и $\mu_{\sigma}(P_i, M_3)$: по Δg – от 2.2 до 6.8 мГал, от 4.2 до 14.4 мГал и от 3.2 до 10.7 мГал; по ξ – от 0.3 до 1.2", от 0.6 до 2.2" и от 0.4 до 1.5"; по η – от 0.3 до 0.9", от 0.6 до 2.1" и от 0.4 до 1.3";

б) $R_{\sigma}(P_i, M_1)$, $R_{\sigma}(P_i, M_2)$ и $R_{\sigma}(P_i, M_3)$: по Δg – от 7.5 до 45.0 мГал, от 8.8 до 47.4 мГал и от 4.2 до 41.6 мГал; по ξ – от 1.2 до 6.8", от 0.8 до 6.2" и от 0.6 до 5.2"; по η – от 1.1 до 6.8", от 1.0 до 6.3" и от 0.6 до 3.6".

Невязки между значениями среднего и медианы и для АСТ и для составляющих УОЛ, как правило, в относительной мере не превышают 15 % (в меньшую сторону). Коэффициенты корреляции значений $m_{\sigma}(P_i, M_k)$ и $\mu_{\sigma}(P_i, M_k)$ меняются от 0.97 до 0.99.

Таким образом, практически для всех районов распределения стандартных отклонений модельных значений АСТ и составляющих УОЛ в одной группе моделей близки к симметричным (слабо асимметричны). При этом асимметрия выражается в некотором превышении доли значений, меньших по отношению к средней величине выборки.

Полученные оценки показывают, что в усредненном смысле наименьшими внутригрупповыми различиями, и по АСТ и по составляющим УОЛ, характеризуется группа M_1 , далее следует группа M_3 . Наибольшие внутригрупповые различия отмечаются в группе M_2 , включающей отечественные модели. Граничные значения показателя μ_{σ} для ультравысокостепенных моделей отличаются от аналогичных оценок этого показателя для высокостепенных моделей, и в части АСТ и в части составляющих УОЛ, примерно в 2.0 раза по группе M_2 и в 1.5 раза по группе M_3 (в сторону уменьшения). Оценки величины R_{σ} демонстрируют, что внутригрупповой диапазон изменения значений σ в одном районе достигает 30–45 мГал по АСТ и 3–6" по составляющим УОЛ. Наименьшие граничные значения R_{σ} , как нижние, так и верхние, отмечаются в группе M_3 .

Районирование внутригрупповых различий иллюстрируется табл. 4, где в качестве информативных показателей использованы μ_{σ} и R_{σ} .

Таблица 4. Зависимость внутригрупповых различий от исследуемого района

Показатель	Группа	Параметр	Район (в порядке возрастания значений показателя)										
			W1	W2	E2	E1	E3	N1	N6	N5	N3	N2	N4
μ_{δ}	M_1	Δg	W1	W2	E2	E1	E3	N1	N6	N5	N3	N2	N4
		ξ	W1	W2	E2	E1	N6	N5	N1	E3	N2	N3	N4
		η	W1	W2	E2	E3	E1	N1	N5	N3	N4	N6	N2
	M_2	Δg	N5	N1	N6	N4	N3	W2	N2	E2	E3	W1	E1
		ξ	N5	W2	N1	N6	N3	E2	N4	N2	W1	E1	E3
		η	N1	N5	N6	W2	N4	N3	W1	E2	E3	N2	E1
	M_3	Δg	N1	W2	N6	N5	N3	N4	N2	W1	E2	E3	E1
		ξ	W2	N5	N1	N6	N3	N2	E2	N4	W1	E3	E1
		η	N1	W2	N6	N5	N3	N4	N2	W1	E2	E3	E1
R_{δ}	M_1	Δg	W2	W1	E2	N1	E1	E3	N6	N5	N4	N2	N3
		ξ	W2	W1	N6	E2	E1	N1	N5	E3	N4	N3	N2
		η	W1	W2	E3	E2	N1	N6	N4	E1	N5	N2	N3
	M_2	Δg	W2	N5	N4	N6	N1	E3	W1	N2	N3	E2	E1
		ξ	W2	N6	N5	N1	N2	N3	E3	E2	N4	W1	E1
		η	N6	W2	N5	N1	N4	E3	W1	N2	N3	E2	E1
	M_3	Δg	W2	N6	N1	N5	N4	N2	E3	W1	N3	E1	E2
		ξ	W2	N1	N6	N5	N2	N3	E3	W1	E2	N4	E1
		η	W2	N6	N1	N5	N4	E3	N2	N3	E1	W1	E2

Районы упорядочены по возрастанию значений соответствующего показателя, слева направо. Области относительно малых и относительно больших различий выделены заливкой серого цвета. Заметно, что каждой группе моделей и каждому виду модельных данных соответствуют свои области наименьших (светлая заливка) и наибольших (темная заливка) внутригрупповых различий.

Области относительно малых значений в совокупности включают: в группе M_1 – районы Черного, Балтийского и Охотского морей; в группах M_2 и M_3 – районы Балтийского, Белого, Восточно-Сибирского и Чукотского морей. В области относительно больших значений во всех трех группах входят районы моря Лаптевых и Карского моря; в группе M_1 – район Баренцева моря; в группах M_2 и M_3 – районы Черного, Берингова, Охотского и Японского морей.

Таким образом, в целом можно считать, что наименьшие внутригрупповые различия моделей ГПЗ приурочены к районам Балтики и восточного сектора арктической зоны, наибольшие внутригрупповые различия сосредоточены преимущественно в восточной зоне и в центральном секторе Арктики. Неоднозначно проявил себя район Черного моря – для ультравысокостепенных моделей он вошел в область относительно малых, а для высокостепенных – в область относительно больших внутригрупповых различий.

Полученные в данной работе оценки межгрупповых различий исследуемых моделей ГПЗ представлены в табл. 5 в виде соответствующих интегральных показателей $\mu_\delta, m_\delta, \sigma_\delta$ и R_δ для рассчитанных по формулам (5) и (6) расхождений между усредненными по группе M_1 , с одной стороны, и по группам M_2 и M_3 , с другой стороны, модельными значениями АСТ и составляющих УОЛ в соответствующих контурных точках. Также в табл. 5 приведены выборочные значения критерия Фишера F для сравниваемых рядов модельных значений АСТ и составляющих УОЛ при уровне значимости $\alpha=0.05$. Сопоставление полученных выборочных значений F с соответствующими критическими значениями, приведенными выше, характеризует статистическую значимость межгрупповых различий.

Согласно табл. 5, интегральные показатели внутригрупповых различий варьируют в пределах (соответственно):

а) $\mu_\delta(P_i, M_1, M_2)$ и $\mu_\delta(P_i, M_1, M_3)$: по Δg – от -5.8 до 2.7 мГал и от -5.0 до 3.4 мГал; по ξ – от -0.7 до $1.4''$ и от -0.7 до $0.9''$; по η – от -0.1 до $0.5''$ и от -0.2 до $0.7''$;

б) $m_\delta(P_i, M_1, M_2)$ и $m_\delta(P_i, M_1, M_3)$: по Δg – от -6.4 до 2.6 мГал и от -6.0 до 2.6 мГал; по ξ – от -0.4 до $1.4''$ и от -0.5 до $0.9''$; по η – от -0.2 до $0.5''$ и от -0.1 до $0.7''$;

в) для $\sigma_\delta(P_i, M_1, M_2)$ и $\sigma_\delta(P_i, M_1, M_3)$: по Δg – от 5.1 до 22.9 мГал и от 5.3 до 22.2 мГал; по ξ – от 0.9 до $2.9''$ (в обоих вариантах); по η – от 0.8 до $2.8''$ (в обоих вариантах);

г) для $R_\delta(P_i, M_1, M_2)$ и $R_\delta(P_i, M_1, M_3)$: по Δg – от 28.1 до 218.2 мГал и от 25.9 до 213.7 мГал; по ξ – от 6.4 до $31.3''$ и от 6.6 до $30.8''$; по η – от 4.4 до $28.5''$ и от 4.1 до $28.5''$.

По сравнению с табл. 3 в данном случае колебания средней и медианы увеличиваются, а коэффициенты корреляции между оценками этих величин, наоборот, уменьшаются, в среднем до 0.78 для АСТ и до 0.84 – 0.85 для составляющих УОЛ. При этом оценочные значения средних не указывают на наличие больших систематических расхождений, за исключением района Японского моря, где, вероятно, погрешности учета градиентов аномального поля моделями проявляют себя наиболее сильно.

Попарное сравнение оценок величин $\sigma_\delta(P_i, M_1, M_{k'})$ и $R_\delta(P_i, M_1, M_{k'})$, где $k'=2, 3$, показало, что разброс межгрупповых различий для группы M_2 , в среднем в более чем в 70% случаев превышает их разброс для группы M_3 , т.е. включение российских моделей увеличивает значения не только внутригрупповых, но и межгрупповых различий.

Анализируя табл. 5, можно видеть, что в категорию районов, где межгрупповые различия моделей ГПЗ являются статистически значимыми в смысле критерия Фишера, в каждом варианте сравнения попадает от четырех до шести районов, в зависимости

Таблица 5. Оценки межгрупповых различий между моделями ГПЗ

Район	M_1-M_2					M_1-M_3				
	μ_δ	m_δ	σ_δ	R_δ	F	μ_σ	m_δ	σ_δ	R_δ	F
Аномалия силы тяжести (Δg , мГал)										
W1	-1.14	-1.73	14.37	97.97	0.15	1.04	0.61	12.19	86.70	0.12
W2	-1.43	-0.94	5.06	28.14	1.38	-2.49	-1.69	5.28	25.89	4.58
N1	-1.30	-1.89	7.73	52.22	3.08	-0.70	-0.92	7.09	51.20	0.90
N2	-0.83	-0.62	12.12	171.38	5.34	-0.09	-0.83	11.36	170.23	0.07
N3	-0.38	-0.01	9.71	218.17	1.52	-0.28	0.12	9.36	213.73	0.86
N4	1.39	1.52	7.10	65.14	16.21	1.01	1.42	7.33	68.31	8.57
N5	1.34	1.44	5.66	40.10	24.19	1.50	1.33	5.96	39.31	31.53
N6	-1.82	-1.08	7.18	38.87	5.02	-0.91	-0.37	6.09	34.28	1.36
E1	4.28	4.04	19.91	125.78	3.07	3.38	2.64	19.42	121.68	1.93
E2	3.14	-1.90	22.89	160.24	5.56	2.75	-2.43	22.24	151.77	4.24
E3	-5.81	-6.44	13.15	67.80	23.02	-4.97	-5.97	12.09	63.40	16.46
Составляющая УОЛ в меридиане (ξ , ")										
W1	-0.72	-0.16	2.56	17.74	2.04	-0.72	0.01	2.49	15.54	2.09
W2	0.21	0.26	0.90	6.96	0.96	0.32	0.34	0.89	6.65	2.35
N1	-0.02	0.08	1.21	10.07	0.01	0.02	0.09	1.11	9.47	0.02
N2	0.33	0.39	1.97	26.97	11.59	0.25	0.22	1.94	26.87	7.08
N3	0.01	-0.08	1.71	31.32	0.03	0.03	-0.07	1.66	30.84	0.21
N4	0.12	0.24	1.48	10.36	8.18	0.12	0.26	1.59	10.85	8.49
N5	-0.34	-0.45	0.94	6.43	18.40	-0.37	-0.46	0.96	7.06	22.09
N6	0.01	0.41	1.52	7.46	0.00	0.07	0.50	1.53	7.52	0.14
E1	-0.16	-0.13	2.86	18.44	0.28	-0.10	-0.03	2.86	20.52	0.11
E2	-0.03	-0.09	2.65	26.04	0.12	0.04	-0.07	2.58	25.55	0.14
E3	1.44	1.42	2.80	13.15	58.39	0.88	0.93	2.52	12.14	24.30
Составляющая УОЛ в первом вертикале (η , ")										
W1	0.02	-0.11	2.04	20.84	0.00	-0.02	-0.01	1.95	20.27	0.00
W2	0.45	0.51	0.80	4.35	12.57	0.57	0.66	0.78	4.12	21.35
N1	0.25	0.33	1.00	9.93	4.42	0.22	0.28	0.96	9.64	3.51
N2	-0.05	0.06	1.97	28.46	0.20	-0.21	-0.13	1.96	28.46	4.11
N3	0.14	0.15	1.47	24.30	4.33	0.15	0.13	1.41	23.19	5.35
N4	0.36	0.43	1.13	10.32	76.95	0.35	0.45	1.08	10.11	68.27
N5	0.02	-0.06	0.91	6.08	0.16	0.04	-0.04	0.94	6.08	0.74
N6	0.11	0.06	0.91	4.74	0.82	0.12	0.15	0.93	4.51	0.98
E1	-0.14	-0.24	2.67	18.38	0.11	-0.06	-0.02	2.49	18.32	0.02
E2	0.12	0.21	2.83	27.65	0.77	0.06	0.12	2.81	26.62	0.21
E3	0.51	0.45	1.37	6.93	11.99	0.66	0.56	1.36	7.26	20.04

от состава группы M_2 или M_3 и моделируемой величины (Δg , ξ или η). При этом в число районов, для которых хотя бы один раз величина F превысила критическое значение F_0 , вошли все районы, кроме района Черного моря. Два района – море Лаптевых и Японское море – входят в указанную категорию во всех шести вариантах. Четырежды попадают в нее районы Баренцева и Восточно-Сибирского морей, трижды – район Балтийского моря, дважды – район Охотского моря.

По аналогии с внутригрупповыми различиями (см. табл. 4), зависимость межгрупповых различий от района иллюстрирует табл. 6 с использованием в качестве информативных показателей σ_δ и R_δ . Районы упорядочены по возрастанию их значений (слева направо). При этом для каждой пары сравниваемых групп (M_1-M_2 , M_1-M_3) серым цветом выделены области относительно малых и относительно больших различий.

Таблица 6. Зависимость межгрупповых различий от исследуемого района

Группа	Показатель	Параметр	Район (в порядке возрастания значений показателя)										
			W2	N5	N4	N6	N1	N3	N2	E3	W1	E1	E2
M_1-M_2	σ_8	Δg	W2	N5	N4	N6	N1	N3	N2	E3	W1	E1	E2
		ξ	W2	N5	N6	N1	N4	N3	N2	E3	W1	E1	E2
		η	W2	N5	N1	N4	N6	N3	N2	W1	E2	E3	E1
	R_8	Δg	W2	N6	N5	N1	N4	E3	W1	E1	E2	N2	N3
		ξ	N5	W2	N6	N1	N4	E3	W1	E1	E2	N2	N3
		η	W2	N6	N5	E3	N1	N4	E1	W1	N3	E2	N2
M_1-M_3	σ_8	Δg	W2	N5	N1	N6	N4	N3	N2	W1	E3	E2	E1
		ξ	W2	N5	N6	N1	N4	E3	N3	N2	W1	E1	E2
		η	W2	N6	N5	N1	N4	E3	N3	W1	N2	E1	E2
	R_8	Δg	W2	N6	N5	N1	E3	N4	W1	E1	E2	N2	N3
		ξ	W2	N5	N6	N1	N4	E3	W1	E1	E2	N2	N3
		η	W2	N6	N5	E3	N1	N4	E1	W1	N3	E2	N2

В целом наименьшими межгрупповыми различиями характеризуются районы Балтийского, Белого, Восточно-Сибирского и Чукотского морей, а наибольшими – Черного, Берингова, Охотского и Японского морей (по σ_8), Черного, Баренцева и Карского морей (по R_8). При этом уровень относительно больших значений σ_8 и R_8 в несколько раз превышает уровень их относительно малых значений: для σ_8 значения выше в 2.5–3 раза, а для R_8 – в 5–6 раз для аномалии силы тяжести Δg и в 4–5 раз для составляющих ξ и η уклонения отвесной линии.

Таким образом, на качественном уровне полученные картины внутригрупповых и межгрупповых различий моделей ГПЗ во многом схожи. Среди факторов, которые послужили причиной этих различий, могут быть особенности исходной информации, использованной при создании модели (состав, объем, точность, полнота, подробность), особенности методов обработки этой информации (состав, настройки и т.п.), аномальность (сложность) гравитационного поля в исследуемом районе, способная оказывать влияние как напрямую, так и косвенно, через факторы первых двух типов.

Внутригрупповые различия, по-видимому, в большей степени вызваны особенностями исходной информации и методов ее обработки. Так, в рамках данного исследования можно было предположить, что ультравысокостепенные модели по сравнению с высокостепенными дадут существенно более выраженные внутригрупповые различия, из-за присутствия в их составе более высокочастотных спектральных компонент. Однако фактический уровень внутригрупповых различий моделей группы M_1 оказался в целом ниже ожидаемого. Вероятно, это обусловлено достаточно высокой степенью сходства моделей данной группы по характеристикам детальной исходной информации, использованной для учета высокочастотной части спектра АСТ, по крайней мере, в полосе морской границы России. Все это может служить косвенным свидетельством того, что с момента выпуска в 2008 г. модели *EGM2008*, ставшей началом серии современных ультравысокостепенных моделей, в имеющейся за рубежом исходной информации о средних значениях АСТ по трапециям $5' \times 5'$ вдоль границы “суша–море” на территории Российской Федерации существенных изменений не произошло.

Что касается сравнительно высокого уровня внутренних различий в группе M_2 , особенно по сравнению с группой M_3 , то его можно считать прямым следствием включения в состав группы M_2 российских моделей высокого разрешения, отличающихся от зарубежных аналогов не только в методическом отношении, но и за счет максимально

возможного использования российских данных при подготовке исходных АСТ по трапециям 30'×30' [Непоклонов, Зуева, Плешаков, 2007].

При интерпретации внутригрупповых различий между глобальными моделями ГПЗ целесообразно помнить, что одним из основных источников детальной исходной информации о гравитационных аномалиях при выводе таких моделей были и остаются АСТ, полученные по данным спутниковой альтиметрии (в Мировом океане).

С точки зрения спутниковой альтиметрии некоторые районы Мирового океана имеют неблагоприятную ледовую обстановку. В этот ряд, в частности, входят районы моря Лаптевых, Карского моря, Берингова моря и др. В таких районах из-за сезонного покрытия льдом регулярное поступление достоверной альтиметрической информации не представляется возможным. Как следствие, результаты определения альтиметрических АСТ в этих условиях могут быть менее стабильными и надежными по сравнению с другими районами Мирового океана. Отмеченное, в свою очередь, может служить дополнительным источником расхождений моделей ГПЗ.

Кроме этого, в прибрежных районах погрешности данных спутниковой альтиметрии могут нарастать из-за течений и других океанологических аномалий, а также из-за аномалий отраженного радиовысотометрического сигнала, вызванных частичным отражением зондирующих импульсов от поверхности суши и перестройкой радиовысотометра при переходе с суши на водную поверхность.

Также аномалии силы тяжести, вычисляемые по данным спутниковой альтиметрии в прибрежной зоне, могут содержать методические погрешности, которые обусловлены недостаточно полным учетом рельефа суши [Конешов, Железняк, 2007]. Вследствие этого различные версии каталога альтиметрических АСТ в прибрежной зоне могут иметь существенные расхождения, вызванные этими факторами. Так, анализ данных спутниковой альтиметрии по Черному морю показал, что на открытых участках (вне континентального склона) они соответствуют требованиям региональных гравиметрических съемок масштаба 1:1000 000, а с приближением к границе “суша–море” погрешности определения альтиметрических АСТ могут возрастать до нескольких десятков миллигал [Лыгин, 2005]. При дальнейшей обработке погрешности определения исходных АСТ переносятся на гармонические коэффициенты геопотенциала, что в итоге становится одним из источников внутригрупповых расхождений моделей ГПЗ высокого и сверхвысокого разрешения, в том числе по границе “суша–море”.

Для межгрупповых различий фактор исходных данных и методических особенностей также является существенным, но при этом возрастает роль гравитационной аномальности исследуемых районов. На это указывают, в частности, межгрупповые различия высокотемпературных и ультравысокотемпературных моделей в районах моря Лаптевых, Карского, Баренцева, Берингова, Охотского, Японского и Черного морей.

Региональные особенности гравитационного поля в Черном море коррелируют с тектоническим районированием. На континентальном склоне и шельфе располагаются крупные положительные аномалии. Акватория между центральной частью моря и шельфом – область интенсивных минимумов поля.

Со стороны западной части Крымского полуострова в западном направлении заметен достаточно плавный переход от слабых положительных значений АСТ (на уровне 10 мГал) к отрицательным значениям, достигающим –35 мГал.

В районе восточного побережья Крымского полуострова и в южной части Азовского моря выделяется область отрицательных аномалий, достигающих нескольких десятков миллигал, что можно объяснить влиянием западной ветви Индоло-Кубанского прогиба.

Южная часть Крымского полуострова охватывается региональным максимумом силы тяжести, выходящим на шельф, где значения аномалий изменяются в пределах от нескольких десятков до сотни миллигал. На востоке этот максимум, проходя по акватории Черного моря, соединяется с крупной положительной аномалией Западного Кавказа. Эта консолидированная структура называется Крымско-Кавказской гравитационной зоной (полосой). Южнее она сменяется областью с достаточно большими горизонтальными градиентами, которая простирается вдоль континентального склона до района Гагры на фоне отрицательных аномалий умеренной интенсивности [Земная ..., 1975; Бурьянов и др., 1998; Ентин, Гинтов, Гуськов, 2010; Старостенко и др., 2019].

Гравитационные аномалии арктических морей при относительно небольших амплитудах отличаются выраженной зональностью, чередованием положительных и отрицательных значений.

Для Центрально-Баренцевского поднятия характерны интенсивные отрицательные и положительные аномалии, вытянутые в ортогональных направлениях – субширотном и субмеридианальном, что может свидетельствовать о присутствии в этой области различных тектонических структур [Каминский, 2009].

В западной части Карского моря можно выделить Баренцево-Карскую аномальную область, в которой преобладают линейные структуры, простирающиеся в северо-северо-восточном направлении. В Печорской аномальной зоне доминирует северо-западное направление аномалий. В Южно-Карской области наряду с северо-западным простираением линейных элементов присутствует север–северо-восточное.

В районе моря Лаптевых также отмечена существенная неоднородность гравитационного поля, отчетливо показывающая линейные отрицательные аномалии, которые обуславливаются скрытыми рифтовыми долинами, заполненными осадками с пониженной плотностью [Кулаков и др., 2013].

Характерная особенность гравитационного поля дальневосточных морей (Берингова, Охотского и Японского) – преобладание положительных АСТ [Непрочнов, Гайманов, Мирлин, 1977]. В целом Охотское море отличается умеренное поле АСТ с положительными значениями около 20–30 мГал. В районах крупных поднятий дна наблюдается увеличение АСТ до 40–50 мГал, например, в районе выхода коренных пород на возвышенности Академии наук. Однако в районах глубоководного желоба и островной дуги выделяются резкие аномалии разного знака от –300 до +200 мГал, что свидетельствует об изостатической нескомпенсированности этих районов [Родников и др., 2005; Сеначин и др., 2013].

Поле АСТ в акватории Японского моря также знакопеременно. Абсолютные значения аномалий, как правило, не превышают нескольких десятков миллигал (экстремумы достигают 80–90 мГал). Максимумы аномалий приурочены к подводным возвышенностям. Вдоль подножия материкового склона тянется полоса интенсивных отрицательных аномалий. Ближе к береговой линии она сменяется положительными значениями. В результате, в зоне материкового склона поле имеет высокие горизонтальные градиенты АСТ. В шельфовой зоне преобладают положительные аномалии, приуроченные к выходам пород базитового состава, хотя встречаются и локальные понижения поля над ослабленными зонами и осадочными депрессиями [Прокудин и др., 2018].

Наибольшие межгрупповые различия исследуемых моделей ГПЗ обнаружены в зоне Черного и дальневосточных морей (по контрасту), в зоне Черного и арктических морей (по перепаду). Эта картина достаточно тесно коррелирует с выявленной ранее областью относительно больших внутригрупповых различий моделей ГПЗ вдоль границы “суша–море” на территории России.

Заключение

В представленной работе для оценки разных моделей ГПЗ проведено сравнение современных глобальных моделей геопотенциала высокого и сверхвысокого разрешения по АСТ и составляющим УОЛ по контурным точкам границы “суша–море” на территории Российской Федерации, включая Крымский полуостров. Отбор контурных точек осуществлялся с использованием географической базы данных *GSHHG* и глобальной цифровой модели высот рельефа и морских глубин *ETOPO01*. Общее количество отобранных контурных точек по всем одиннадцати проанализированным граничным районам составило 17970. Сравнительное исследование проведено на двадцати двух моделях, выпущенных в период 1996–2019 гг., среди которых восемь моделей сверхвысокого и четырнадцать моделей высокого разрешения, в том числе четыре российские.

В соответствии с разработанной методикой сравнения глобальных моделей ГПЗ для каждого района, в каждой его контурной точке рассчитаны значения АСТ и составляющих УОЛ по каждой отдельно взятой модели по формулам (1)–(3).

Анализ полученных модельных значений позволил оценить расхождения между моделями по границе “суша–море”, обобщенно представив их в виде внутригрупповых и межгрупповых различий. Были рассмотрены три группы моделей – группа из восьми ультравысококачественных моделей, группа из четырнадцати высококачественных моделей, включающая четыре российских, и группа из десяти зарубежных моделей высокого разрешения.

Установлено, что внутригрупповые различия наименее выражены для ультравысококачественных моделей, по стандартным отклонениям – от 2.2 до 6.8 мГал для Δg , от 0.3 до 1.2" для ξ и от 0.3 до 0.9" для η . Для моделей высокого разрешения интенсивность внутригрупповых различий возрастает в 1.5–2 раза, причем в наибольшей степени – при добавлении российских моделей. Вероятная причина этих различий – более значимые расхождения между высококачественными моделями по сравнению с ультравысококачественными моделями по исходной информации и методам ее обработки.

По сравнению с внутригрупповыми различиями глобальных моделей ГПЗ их межгрупповые различия являются более контрастными, возможно, как следствие более высокой чувствительности ультравысококачественных моделей к высокочастотным компонентам АСТ и составляющих УОЛ. В исследуемых районах амплитуды межгрупповых различий в значениях стандартных отклонений составляют в среднем от 8.5 до 9.0 мГал по АСТ и 1" по обоим составляющим УОЛ. Это в 1.5–2 раза и более превышает аналогичные показатели внутригрупповых различий по тем же параметрам и свидетельствует о более высокой информативности межгрупповых различий, особенно если их уровень является статистически значимым. При этом влияние российских моделей на межгрупповые различия моделей разных классов в целом менее выражено по сравнению с их влиянием на внутригрупповые различия моделей высокого разрешения.

Полученные сравнительные оценки характеризуют зависимость внутригрупповых и межгрупповых различий современных моделей ГПЗ от изучаемого участка береговой линии. По обобщенным оценкам, наибольшие межгрупповые различия моделей ГПЗ характерны для района Черного моря, дальневосточных морей (по контрасту) и арктических морей (по перепаду). Наибольшие внутригрупповые различия выявлены преимущественно в зоне дальневосточных морей и в центральном секторе Арктики. Район Черного моря в данном случае неоднозначен: относительно большие различия для высококачественных моделей при относительно малых различиях в группе ультравысококачественных моделей.

Разработанная методика и реализующее ее программное обеспечение могут использоваться для развития начатых в данной работе исследований по следующим направлениям: актуализация сравнительных характеристик моделей ГПЗ в переходных районах с учетом новых моделей; варьирование состава рассматриваемых районов за счет добавления новых территорий, объединения анализируемых районов из первоначальной нарезки в более крупные участки или, наоборот, деления этих районов на более мелкие части; ленточное расширение области сравнения, т.е. использование для сравнения моделей не только контурных точек береговой линии, но и точек, расположенных с обеих сторон с заданной дискретностью в полосе расширения заданных размеров.

Финансирование

Представленная работа частично выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для Московского государственного университета геодезии и картографии (проект № 0708-2020-0001), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05- 00524).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Бурьянов В.Б., Макаренко И.В., Оровецкий Ю.П., Старостенко В.И. Геологическая природа Крымско-Кавказской гравитационной зоны // Геофизический журнал. 1998. Т. 20, № 6. С.45–53.
- Верба М.Л., Будагов А.Г., Келлер М.Б., Грязнов Н.Н., Григоренко Ю.Н. Проблемы изучения нефтегазоносности транзитных зон арктического шельфа России // Геология нефти и газа. 2000. № 6. С.2–7.
- Геологический словарь. Т. 2 / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М.: Недра, 1978. 447 с.
- Демьянов Г.В., Бровар Б.В., Крюкова А.В., Майоров А.Н., Назарова Н.Г., Пашина Н.Н., Таранов В.А. Модель гравитационного поля Земли ЦНИИГАиК, ГАО-98 // Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. Физическая геодезия. М.: ЦНИИГАиК, 1999. С.88–116.
- Демьянов Г.В., Сермягин Р.А. Планетарные модели гравитационного поля Земли и их роль в современных условиях развития геодезии // Геодезия и картография. 2009. № 10. С.8–13.
- Ентин В.А., Гинтов О.Б., Гуськов С.И. Еще раз о природе Крымской гравитационной аномалии // Геофизический журнал. 2010. Т. 32, № 6. С.119–134.
- Земная кора и история развития Черноморской впадины / Под ред. Б.К. Баланадзе, Ю.Д. Буланже, М.В. Муратова, С.И. Субботина. М.: Наука, 1975. 358 с.
- Каминский В.Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб.: ФГУП “ВНИИ Океангеология им. И.С. Грамберга”, 2009. 47 с.
- Канушин В.Ф., Карпик А.П., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Косарева А.М., Косарев Н.С. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 270 с.
- Кащеев Р.А., Комаров Р.В., Новлянская И.О., Хуснутдинов Н.Р. Сравнительный анализ моделей геопотенциала по результатам описания регионального геоида зоны Поволжья // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64, № 1. С.32–37.

- Конешов В.Н., Железняк Л.К. Изучение гравитационного поля Мирового океана // Вестник Российской академии наук. 2007. Т. 77, № 5. С.408–419.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б. Исследование точности представления гравитационного поля Земли в полярных районах по данным глобальных моделей геопотенциала // Физика Земли. 2018. № 3. С.123–131.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Сермягин Р.А., Лидовская Е.А. Современные глобальные модели гравитационного поля Земли и их погрешности // Гироскопия и навигация. 2013. № 1. С.107–118.
- 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.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Спиридонова Е.С., Максимова М.В. Особенности сравнительной оценки глобальных моделей гравитационного поля Земли // Физика Земли. 2020. № 2. С.115–126.
- Коротков С.Б. Выполнение сейсморазведочных работ в переходных зонах суша–море // Вести газовой науки. 2010. № 2 (5). С.120–123.
- Кулаков И.Ю., Гайна К., Добрецов Н.Л., Василевский А.Н., Бушенкова Н.А. Реконструкции перемещений плит в арктическом регионе на основе комплексного анализа гравитационных, магнитных и сейсмических аномалий // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С.1108–1125.
- Лыгин И.В. Структура земной коры Черного моря по комплексу геофизических данных: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2005. 185 с.
- Мориц Г. Современная физическая геодезия. Пер. с англ. М.: Недра, 1983. 392 с.
- Муравьев Л.А. Общеземные базы данных гравитационного поля земли на территорию приарктической части уральского региона // Уральский геофизический вестник. 2019. № 2(36). С.46–53.
- Непоклонов В.Б., Зуева А.Н., Плешаков Д.И. Вопросы разработки и применения систем компьютерного моделирования для глобальных исследований гравитационного поля Земли // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2007. № 2. С.79–97.
- Непрочнов Ю.П., Гайнанов А.Г., Мирлин Е.Г. Строение земной коры и геофизические поля глубоководных впадин внутриматериковых и окраинных морей // Глубинное строение и геофизические особенности структур земной коры и верхней мантии. М.: Наука, 1977. С.45–57.
- Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). М.: ВТУ ГШ ВС, 2020. 64 с. <https://structure.mil.ru/files/pz-90.pdf>
- Прокудин В.Г., Съедин В.Т., Валитов М.Г., Медведев С.Н. Центральная котловина Японского моря: история изучения и тектоника // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2018. Вып. 40, № 4. С.82–104.
- Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с.
- Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И. Геотраверс региона Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2005. № 5. С.45–58.
- Сеначин В.Н., Веселов О.В., Семакин В.П., Кочергин Е.В. Цифровая модель земной коры Охотоморского региона // Геоинформатика. 2013. № 4. С.33–44.
- Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Куприенко П. Я., Савченко А.С., Легостаева О.В. Плотностная неоднородность земной коры Черноморской мегавпадины и прилегающих территорий по данным трехмерного гравитационного моделирования. I. Региональное распределение плотности на разных глубинах // Геофизический журнал. 2019. Т. 41, № 4. С.3–39.
- Трофименко С.В. Структура и динамика геофизических полей и сейсмических процессов в блоковой модели земной коры: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск: ГОУ ВПО “НИ ТПУ”, 2011. 240 с.

- Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры. Книга 2. Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. Учебное пособие. Дубна: Международный университет природы, общества и человека “Дубна”, 1999. 184 с.
- Amante C., Eakins B.W.* ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. Boulder, Colorado: National Geophysical Data Center, NOAA. 2009. 19 p. DOI: 10.7289/V5C8276M
- International Centre for Global Earth Models (ICGEM): Global Gravity Field Models. Potsdam: Helmholtz centre – GFZ. URL: http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime. (дата обращения: 30.09.2021).
- Wessel P., Smith W.H.F.* A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1996. V. 101, N B4. P.8741–8743.
- Li X., Götze H.J.* Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics // *Geophysics*. 2001. V. 66, N 6. P.1660–1668.

Сведения об авторах

КОНЕШОВ Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, руководитель научного 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) 254-23-345. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

НЕПОКЛОНОВ Виктор Борисович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии. 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: vbnep@mail.ru

СПИРИДОНОВА Елена Станиславовна – научный сотрудник, Московский государственный университет геодезии и картографии. 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4. Тел.: +7(499) 404-12-20 доб. 44-02. E-mail: nauka@miigaik.ru

COMPARISON OF EARTH'S GRAVITATIONAL FIELD MODELS IN TRANSITION AREAS

V.N. Koneshov¹, V.B. Nepoklonov^{1,2}, E.S. Spiridonova²

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

² *Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

Corresponding author: V.N. Koneshov (e-mail: slavakoneshov@hotmail.com)

Abstract. The method for comparing global models of the Earth's gravitational field in the form of expansion of the geopotential into a series of spherical harmonics is presented. In accordance with it, new experimental data supplementing and detailing the comparative characteristics of modern models including their spatial resolution are obtained. The peculiarities of the experimental data obtained in this work is that they describe in detail how the studied models converge or differ from each other statistically in the values of gravity anomalies and deflections of plumb lines in transition areas from land to sea (using the contour points of the coastline of Russia along its entire length as an example). The considered models were analyzed by groups: the first included eight ultra-high-resolution models (up to 1420–2190th order of the geopotential expansion), the second – fourteen high-resolution models (up to 360–720th order of the geopotential expansion), including four Russian models. The study analyzed both intragroup and intergroup differences. The obtained statistical characteristics are zoned for eleven marginal seas – the Black, Baltic and from the White to the Sea of Japan. It was found that the parameters of intra-group differences of high-resolution models in general are 1.5–2 times higher than those of ultra-high-resolution models. It is shown that, depending on the studied area of the coastline, the greatest inter-group differences are observed for the Black Sea, the Far Eastern seas (by contrast) and

the Arctic seas (by range). The largest intragroup differences are characteristic mainly for the zone of the Far Eastern seas, the central sector of the Arctic, and the Black Sea region, in the latter case, only for high-resolution models. The possibilities of using the developed method for comparative studies of modern models of the Earth's gravitational field in transition areas are noted.

Keywords: Earth's gravitational field, model, gravity anomaly, plumb line deflection, transition region, coastline, Russia, comparative study.

Funding

The study was partially carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Moscow State University of Geodesy and Cartography no. 0708-2020-0001, as well as with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-05-00524).

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Amante C., Eakins B.W., *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, Boulder, Colorado: National Geophysical Data Center, NOAA, 2009, 19 pp. DOI: 10.7289/V5C8276M
- Buryanov V.B., Makarenko I.V., Orovetskiy Yu.P., Starostenko V.I., Geological nature of the Crimean-Caucasian gravitational zone, *Geofizicheskiy zhurnal* (Geophysical journal), 1998, vol. 20, no. 6, pp. 45-53. [In Russian].
- Demyanov G.V., Brovar B.V., Kryukova A.V., Mayorov A.N., Nazarova N.G., Pashina N.N., Taranov V.A., Model of the gravitational field of the Earth TsNIIGAiK, GAO-98, in *Nauchno-tehnicheskiiy sbornik po geodezii, aerokosmicheskim s"yemkam i kartografii. Fizicheskaya geodeziya* (Scientific and technical collection on geodesy, aerospace surveys and cartography. Physical geodesy), Moscow: TsNIIGAiK, 1999, pp. 88-116. [In Russian].
- Demyanov G.V., Sermyagin R.A., Planetary models of the Earth's gravitational field and their role in modern conditions of geodesy development, *Geodeziya i kartografiya* (Geodesy and Cartography), 2009, no. 10, pp. 8-13. [In Russian].
- Entin V.A., Gintov O.B., Guskov S.I., Once again about the nature of the Crimean gravitational anomaly, *Geofizicheskiy zhurnal* (Geophysical journal), 2010, vol. 32, no. 6, pp. 119-134. [In Russian].
- Geologicheskiiy slovar'* (Geological dictionary), Moscow: Nedra, 1978, 447 p. [In Russian].
- International Centre for Global Earth Models (ICGEM): Global Gravity Field Models. Potsdam: Helmholtz centre – GFZ. URL: http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime
- Kaminskiy V.D., Deep structure of the Central Arctic basin in connection with the substantiation of the outer boundary of the continental shelf of the Russian Federation and the assessment of hydrocarbon resources, *Extended Abstract of Doctoral Sci. (Geol.-Mineral.) Dissertation*, St. Petersburg: FGUP "VNII Okeanogeologiya im. I.S. Gramberga", 2009, 47 p. [In Russian].
- Kanushin V.F., Karpik A.P., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Kosareva A.M., Kosarev N.S., *Issledovaniye sovremennykh global'nykh modeley gravitatsionnogo polya Zemli* (A study of current global models of the gravitational field of the Earth), Novosibirsk: SGUGiT, 2015, 270 p. [In Russian].
- Kascheev R.A., Komarov R.V., Novlyanskaya I.O., Khusnutdinov N.R., Comparative analysis of geopotential models based on the results of the description of the regional geoid of the Volga region, *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"yemka* (Bulletin of universities. Geodesy and aerial photography), 2020, vol. 64, no. 1, pp. 32-37. [In Russian].
- Khmelevskoy V.K., *Geofizicheskie metody issledovaniya zemnoi kory. Kniga 2. Regional'naya, razvedochnaya, inzhenernaya i ekologicheskaya geofizika. Uchebnoe posobie* (Geophysical methods for studying the earth's crust. Book 2. Regional, exploration, engineering and environmental geophysics. Tutorial.), Dubna: Mezhdunarodnyi universitet prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna", 1999, 184 p. [In Russian].

- Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Investigation of the accuracy of the representation of the Earth's gravitational field in polar regions according to global geopotential models, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 504-512.
- Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Sermyagin R.A., Lidovskaya E.A., Modern global models of the Earth's gravitational field and their errors, *Giroskopiya i navigatsiya* (Gyroscopy and Navigation), 2013, no. 1, pp. 107-118. [In Russian].
- Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Solov'ev V.N., Zheleznyak L.K., Comparison of modern global ultra-high-power models of the Earth's gravitational field, *Geofizicheskiye issledovaniya* (Geophysical research), 2019, vol. 20, no. 1, pp. 13-26. [In Russian].
- Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Spiridonova E.S., Maksimova M.V., Features of comparative evaluation of global models of the Earth's gravitational field, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 249-259.
- Koneshov V.N., Zheleznyak L.K., Study of the gravitational field of the World Ocean, *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk* (Bulletin of the Russian Academy of Sciences), 2007, vol. 77, no. 5, pp. 408-419. [In Russian].
- Korotkov S.B., Performing seismic exploration in land-sea transition zones, *Vesti gazovoy nauki* (News of gas science), 2010, no. 2 (5), pp. 120-123. [In Russian].
- Kulakov I.Yu., Gaina K., Dobretsov N.L., Vasilevsky A.N., Bushenkova N.A., Reconstructions of plate movements in the Arctic region based on a comprehensive analysis of gravitational, magnetic, and seismic anomalies, *Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 859-873.
- Li X., Götze H.J., Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics, *Geophysics*, 2001, vol. 66, no. 6, pp. 1660-1668.
- Lygin I.V., Structure of the Earth's crust of the Black Sea on the complex of geophysical data, *Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) Dissertation*, Moscow: Mosk. gos. un-t im. M.V. Lomonosova, 2005, 185 p. [In Russian].
- Moritz H., *Sovremennaya fizicheskaya geodeziya* (Modern physical geodesy), Moscow: Nedra, 1983, 392 p. [In Russian].
- Muravyev L.A., All-Earth databases of the earth's gravitational field on the territory of the practical part of the Ural region, *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* (Ural Geophysical Bulletin), 2019, no. 2(36), pp. 46-53. [In Russian].
- Nepoklonov V.B., Zueva A.N., Pleshakov D.I., Issues of development and application of computer modeling systems for global studies of the Earth's gravitational field, *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'yemka* (Bulletin of universities. Geodesy and aerial photography), 2007, no. 2, pp. 79-97. [In Russian].
- Neprochnov Yu.P., Gainanov A.G., Mirlin E.G., The structure of the Earth's crust and the geophysical fields of deep-water depressions in the inland and marginal seas, *Glubinnoye stroyeniye i geofizicheskiye osobennosti struktur zemnoy kory i verkhney mantii* (Deep structure and geophysical features of the structures of the Earth's crust and upper mantle), Moscow: Nauka, 1977, pp. 45-57. [In Russian].
- Parametry Zemli 1990 goda (PZ-90.11)* (Parameters of the Earth in 1990), Moscow: VTU GSh VS, 2020, 64 p. [In Russian]. <https://structure.mil.ru/files/pz-90.pdf>
- Prokudin V.G., Syedin V.T., Valitov M.G., Medvedev S.N., Central basin of the Sea of Japan: history of study and tectonics, *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* (Bulletin of KRAUNTS. Series: Earth Sciences), 2018, iss. 40, no. 4, pp. 82-104. [In Russian].
- Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B., Rashidov V.A., Sergeeva N.A., Filatova N.I., Geotraverse of the Sea of Okhotsk region, *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* (Bulletin of KRAUNTS. Series: Earth Sciences), 2005, no. 5, pp. 45-58. [In Russian].
- Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Rashidov V.A., Sergeeva N.A., *Geodinamicheskiye modeli glubinnogo stroyeniya regionov prirodnykh katastrof aktivnykh kontinental'nykh okrain* (Geodynamic models of the deep structure of regions of natural disasters in active continental margins), Moscow: Scientific world, 2014, 172 p. [In Russian].
- Senachin V.N., Veselov O.V., Semakin V.P., Kochergin E.V., Digital model of the Earth's crust of the Okhotsk Sea region, *Geoinformatika* (Geoinformatics), 2013, no. 4, pp. 33-44. [In Russian].
- Starostenko V.I., Makarenko I.B., Rusakov O.M., Kuprienko P.Ya., Savchenko A.S., Legostaeva O.V., Density heterogeneity of the earth's crust of the Black Sea megadepression and adjacent territories according to the data of three-dimensional gravity modeling. Regional density distribution at different depths, *Geofizicheskiy zhurnal* (Geophysical journal), 2019, vol. 41, no. 4, pp. 3-39. [In Russian].
- Trofimenko S.V., Structure and dynamics of geophysical fields and seismic processes in the block model of the Earth's crust, *Doctoral Sci. (Geol.-Mineral.) Dissertation*, Tomsk: GOU VPO "NI TPU", 2011, 240 p.

- Verba M.L., Budagov A.G., Keller M.B., Gryaznov N.N., Grigorenko Yu.N., Problems of studying the oil and gas potential of transit zones of the Arctic shelf of Russia, *Geologiya nefi i gaza* (Geology of oil and gas), 2000, no. 6, pp. 2-7. [In Russian].
- Wessel P., Smith W.H.F., A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, vol. 101, no. B4, pp. 8741-8743.
- Zemnaya kora i istoriya razvitiya Chernomorskoy vpadiny* (The Earth's crust and the history of the development of the Black Sea depression), Moscow: Nauka, 1975, 358 p. [In Russian].

About the authors

KONESHOV Vyacheslav Nikolayevich – 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) 254-23-45. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

НЕПОКЛОНОВ Виктор Борисович – 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; Professor, Moscow State University of Geodesy and Cartography. Gorokhovskiy pereulok, 4, Moscow, 105064, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-35. E-mail: vbnep@mail.ru

SPIRIDONOVA Yelena Stanislavovna – Researcher, Moscow State University of Geodesy and Cartography. Gorokhovskiy pereulok, 4, Moscow, 105064, Russia. Ph.: +7(499) 404-12-20#44-02. E-mail: nauka@miigaik.ru