

В. Н. КОНЕШОВ, В. Б. НЕПОКЛОНОВ, И. А. СТОЛЯРОВ

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОПОТЕНЦИАЛА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСНЫХ ЛИНИЙ
В АРКТИКЕ**

В статье продолжен анализ результатов моделирования аномального гравитационного поля Земли в высокоширотных районах, вызывающих интерес с точки зрения освоения Арктики. Исследована структура и точностные характеристики уклонов отвесных линий в Арктике. Исследование проведено с использованием 16 современных российских и зарубежных моделей сферических гармоник гравитационного потенциала Земли, в том числе ультравысококачественной модели EGM-2008, первых моделей, созданных на основе данных спутниковой градиентометрии, и новой российской модели ГАО-2012.

Геодезическое обеспечение мероприятий по реализации «Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом Российской Федерации 18 сентября 2008 г., связано с определением в районах высоких широт параметров аномального гравитационного поля Земли (АГПЗ), к которым наряду с высотами квазигеоида (ВКГ) и аномалиями силы тяжести (АСТ) относят отклонения отвесных линий (УОЛ). Значение УОЛ напрямую зависит от распределения масс в земной коре. Как следствие, эти данные могут использоваться в целях разведки запасов нефти, природного газа и минерального сырья.

Определение УОЛ в Арктике с требуемой на сегодняшний день точностью и полнотой сталкивается с необходимостью использования глобальных моделей АГПЗ в виде разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям [1]. Таким образом, целесообразно иметь представление о том, как и насколько адекватно указанные модели описывают УОЛ в районах высоких широт.

Исходя из этого настоящая статья дополняет ранее выполненные исследования современных глобальных моделей АГПЗ в Арктике [2]; проводится сравнительный анализ тех же моделей по значениям составляющих УОЛ ξ, η в меридиане и первом вертикале. Как и в указанной работе, модели исследовались в высокоширотной области $\Omega = \{B, L : 70^\circ \leq B \leq 90^\circ; 0^\circ \leq L \leq 360^\circ\}$, где B, L – геодезические координаты точек (широта, долгота). Методика исследования и используемое программное обеспечение также практически не претерпели изменений. Что касается состава исследуемых моделей (табл. 1), была добавлена

Конешов Вячеслав Николаевич. Доктор технических наук, заместитель директора по науке Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (Москва). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Непоклов Виктор Борисович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН.

Столяров Игорь Анатольевич. Старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии (Москва).

новая отечественная модель ГАО-2012 до 360-й степени, недавно полученная в ЦНИИ ГАиК [3]. При ее создании впервые в отечественной практике были использованы данные европейского проекта GOCE по изучению АГПЗ с использованием спутниковой градиентометрии.

Т а б л и ц а 1

Сведения об исследуемых моделях геопотенциала

Наименование модели	Год выпуска	Страна (организация)	N	Исходные данные
EGM-96	1996	США	360	С, Г, А
ГАО-98	1998	Россия (ЦНИИГАиК)	360	С, Г, А
GPM-98	1998	ФРГ	1800	С, Г, А
ПЗ-2002/360	2002	Россия (29 НИИ МО)	360	С, Г, А
EIGEN-CG03C	2005	ФРГ	360	C(CHAMP, GRACE), Г, А
EIGEN-GLO4C	2006	ФРГ, Франция	360	C (GRACE, LAGEOS), Г, А
ГАО-2008	2008	Россия (ЦНИИГАиК, 29 НИИ МО)	360	C (CHAMP, GRACE), Г, А
EGM-2008	2008	США	2160	C(GRACE), Г, А
EIGEN-5C	2008	ФРГ, Франция	360	C(GRACE, LAGEOS), Г, А
GGM-03C	2009	США	360	C(GRACE), Г, А
GOCE-DIR	2010	ФРГ, Франция	240	C (GOCE)
GOCE-TIM	2011	ФРГ, Австрия	250	C (GOCE)
GOCO02S	2011	Австрия, ФРГ, Швейцария	250	C (GOCE, GRACE, CHAMP и др.)
EIGEN-6C	2011	ФРГ, Франция	1420	C (GOCE, GRACE, LAGEOS), Г, А
GIF48	2011	США	360	C(GRACE), Г, А
ГАО-2012	2012	Россия (ЦНИИГАиК)	360	C(GOCE), Г, А

Примечание: С – спутниковые; Г – гравиметрические; А – альтиметрические.

N – максимальная степень сферических гармоник геопотенциала.

Для анализа использовались значения составляющих УОЛ ξ, η на общеземном эллипсоиде ПЗ-90.02, вычисленные в центрах стандартных географических трапеций $5 \times 5'$, отдельно в секторе полярной шапки Ω_0 ($B \geq 85^\circ$) и в остальной части исследуемой области: $\Omega_1 = \Omega - \Omega_0$.

Величины ξ, η вычислялись по формулам [3]:

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

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

где 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); N – предел суммирования; γ – нормальное ускорение силы тяжести в расчетной точке.

Оценивались статистические характеристики значений ξ, η для каждой отдельно взятой модели и их отклонений ($\delta\xi = \xi - \xi_0, \delta\eta = \eta - \eta_0$) от «эталонных» значений ξ_0, η_0 . Согласно [2] «эталоном» служили данные модели EGM-2008. В качестве статистических характеристик использовались среднее значение μ , стандартное отклонение σ , минимальное (min) и максимальное (max) значения.

Оценки для каждой модели приведены в табл. 2–5. Там же приведены усредненные оценки по группам: отечественные и зарубежные; спутниковые и комбинированные; низкостепенные ($N \leq 360$) и высокостепенные ($N \geq 1420$); выпущенные до и после наступления 2005 года. Фактически последние две группы – это модели, созданные без использования и с использованием новых методов космической геодезии, реализованных в системах CHAMP, GRACE и GOCE [5].

Здесь величины $\mu, \sigma, \min, \max$ могут рассматриваться как обобщенные характеристики структуры горизонтальных градиентов потенциала АГПЗ в исследуемом районе. Как и в случае с ВКГ и АСТ [2], оценки, полученные по различным моделям, в основном согласуются между собой, включая и новую модель ГАО-2012.

Таблица 2
Статистические характеристики модельных УОЛ в меридиане, угл. с

Модель	Ω_0				Ω_1			
	min	max	μ	σ	min	max	μ	σ
EGM-96	-10,68	13,23	0,66	3,05	-27,25	21,40	-1,08	4,44
ГАО-98	-6,00	6,52	0,07	2,38	-19,40	19,62	-0,97	3,92
GPM-98	-13,23	15,20	0,65	3,72	-26,73	42,65	-1,08	4,59
ПЗ-2002/360	-9,44	10,85	0,41	2,98	-25,08	19,37	-1,10	4,10
EIGEN-CG03C	-8,94	11,81	0,09	3,22	-27,28	20,50	-1,06	4,40
EIGEN-GLO4C	-9,25	12,36	0,08	3,21	-27,13	20,71	-1,07	4,38
ГАО-2008	-11,37	13,11	0,07	3,53	-38,40	32,21	-1,07	5,34
EGM-2008	-35,42	37,36	0,20	9,50	-46,73	46,02	-1,07	8,00
EIGEN-5C	-9,21	11,48	0,16	3,09	-27,66	20,50	-1,07	4,36
GGM-03C	-10,32	11,41	0,24	3,23	-26,23	19,90	-1,07	4,36
GOCE-DIR(3)	-9,25	9,73	-0,28	3,74	-26,77	20,10	-1,05	4,18
GOCE-TIM(3)	-8,06	9,21	0,40	3,23	-27,36	19,82	-1,06	4,19
GOCO02S	-9,91	13,90	0,37	3,41	-27,45	20,46	-1,08	4,24
EIGEN-6C	-21,24	20,12	0,17	4,31	-37,43	35,35	-1,07	4,92
GIF48	-10,03	11,92	0,24	3,23	-26,71	21,52	-1,07	4,38
ГАО-2012	-11,26	11,57	0,06	3,60	-32,27	26,23	-1,06	5,06
Отечественные	-9,52	10,51	0,15	3,12	-28,79	24,36	-1,05	4,61
Зарубежные	-12,96	14,81	0,30	3,91	-29,56	25,74	-1,07	4,70
Спутниковые	-9,07	10,95	0,35	3,46	-27,19	20,13	-1,06	4,20
Комбинированные	-12,98	14,48	0,20	3,83	-30,09	27,05	-1,06	4,82
Низкостепенные	-9,52	11,32	0,24	3,22	-27,61	21,72	-1,06	4,41
Высокостепенные	-23,30	24,23	0,34	5,84	-36,96	41,34	-1,07	5,84
До 2005 года	-9,84	11,45	0,45	3,03	-24,62	25,76	-1,06	4,26
После 2005 года	-12,86	14,50	0,20	3,94	-30,95	25,28	-1,07	4,82

Средние значения η (и $\delta\eta$) для всех моделей в пределах принятой точности вычислений не отличаются от нуля (табл. 3, 5), поскольку

$$\mu = \frac{1}{M_B M_L} \sum_{i=1}^{M_B} \sum_{j=1}^{M_L} \eta(\varphi_i, \lambda_j) \approx \frac{1}{2\pi M_B} \sum_{i=1}^{M_B} \frac{\zeta(\varphi_i, 0) - \zeta(\varphi_i, 2\pi)}{r_i} \text{ и } \zeta(\varphi_i, 0) = \zeta(\varphi_i, 2\pi), \quad (3)$$

где M_B и M_L – соответственно, число расчетных точек по меридианам и параллелям исследуемой области Ω_0 (Ω_1); r_i – радиус параллели на широте φ_i ; ζ – высота квазигеоида.

Т а б л и ц а 3

Статистические характеристики модельных УОЛ в первом вертикале, угл.с

Модель	Ω_0				Ω_1			
	min	max	μ	σ	min	max	μ	σ
EGM-96	-16,21	19,55	0,00	4,06	-21,37	29,59	0,00	4,98
ГАО-98	-7,65	6,10	0,00	2,61	-17,96	21,09	0,00	4,38
GPM-98	-17,70	20,49	0,00	4,48	-30,79	33,44	0,00	5,19
ПЗ-2002/360	-14,54	17,71	0,00	3,84	-21,49	28,10	0,00	4,80
EIGEN-CG03C	-10,86	14,25	0,00	3,73	-22,96	27,95	0,00	4,84
EIGEN-GLO4C	-11,25	14,05	0,00	3,61	-22,65	27,40	0,00	4,82
ГАО-2008	-20,95	25,42	0,00	4,99	-31,22	43,91	0,00	6,13
EGM-2008	-42,91	41,01	0,00	9,87	-44,90	46,16	0,00	8,00
EIGEN-5C	-10,81	13,74	0,00	3,56	-22,36	26,78	0,00	4,84
GGM-03C	-10,84	13,51	0,00	3,53	-21,84	27,72	0,00	4,78
GOCE-DIR	-8,86	10,58	0,00	3,41	-19,12	26,07	0,00	4,65
GOCE-TIM	-7,87	9,19	0,00	3,80	-19,14	26,89	0,00	4,69
GOCO02S	-8,39	9,40	0,00	2,93	-19,44	26,80	0,00	4,72
EIGEN-6C	-19,25	24,24	0,00	4,36	-33,79	33,54	0,00	5,32
GIF48	-10,38	13,83	0,00	3,67	-22,26	28,80	0,00	4,84
ГАО-2012	-22,38	25,43	0,00	4,96	-32,07	40,14	0,00	5,77
Отечественные	-16,38	18,67	0,00	4,10	-25,69	33,31	0,00	5,27
Зарубежные	-14,61	16,99	0,00	4,25	-25,05	30,10	0,00	5,14
Спутниковые	-8,37	9,72	0,00	3,38	-19,23	26,59	0,00	4,69
Комбинированные	-16,59	19,18	0,00	4,41	-26,59	31,89	0,00	5,28
Низкостепенные	-12,38	14,83	0,00	3,75	-22,61	29,33	0,00	4,94
Высокостепенные	-26,62	28,58	0,00	6,24	-36,49	37,71	0,00	6,17
До 2005 года	-14,03	15,96	0,00	3,75	-22,90	28,06	0,00	4,84
После 2005 года	-15,40	17,89	0,00	4,37	-25,98	31,85	0,00	5,28

В отличие от η величина ξ имеет выраженный постоянный тренд с положительными значениями: в зоне Ω_0 – от 0,1 до 0,7'' (за исключением одной модели – GOCE_DIR); в зоне Ω_1 – от 1,0 до 1,1''. При переходе из Ω_0 в Ω_1 оценки тренда заметно возрастают, но становятся более стабильными. Как следствие, смещение величины $\delta\xi$ в зоне Ω_1 практически исчезает, в то время как в зоне Ω_0 оно сохраняется на уровне нескольких десятых долей угловой секунды. Различие статистических характеристик АГПЗ в зонах Ω_0 и Ω_1 проявляется и в том, что в Ω_0 стандартные отклонения и разброс модельных значений ξ и η , как правило, существенно меньше, чем в Ω_1 . Это согласуется с соотношением аналогичных характеристик ВКГ и АСТ [2] и также может быть в известной степени обусловлено повышением аномальности геопотенциала в зоне Ω_1 , в данном случае – его горизонтальных градиентов.

Сделанный ранее на основании анализа модельных ВКГ и АСТ вывод о том, что Арктика может быть отнесена к категории районов средней аномальности [2], подтверждается анализом модельных значений составляющих УОЛ. В частности, гистограммы, приведенные на рис. 1, на примере модели EGM-2008 показывают, что в основном вычисленные значения ξ, η лежат в интервале от -10 до +10'' (~70% в Ω_0 и ~80% в Ω_1).

Вместе с этим распределение величин ξ, η не является однородным. Как и в случае АСТ [2], обнаруживаются коротковолновые эффекты, в том числе проявляющиеся в виде протяженных линейных элементов, ориентированных в меридиональном (продольном) и поперечном направлениях, что наглядно демонстрируется, например, в районах Гренландии, островов Новая Земля и Земля Франца-Иосифа.

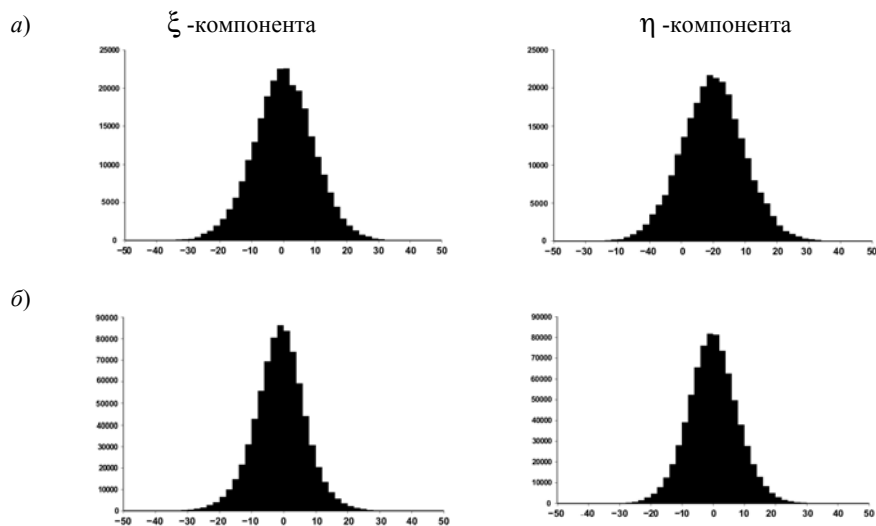


Рис. 1. Гистограммы распределения составляющих УОЛ в области Ω_0 (а) и Ω_1 (б)

Таблица 4

Статистические характеристики отклонений модельных значений ξ -компоненты УОЛ от «эталонных» значений, угл. с

Модель	Ω_0				Ω_1			
	min	max	μ	σ	min	max	μ	σ
EGM-96	-36,21	36,10	0,46	9,16	-45,13	39,21	-0,01	6,96
ГАО-98	-36,81	34,08	-0,13	9,15	-44,14	41,47	0,10	6,99
GPM-98	-37,73	39,16	0,45	9,42	-38,66	45,66	-0,01	7,26
ПЗ-2002/360	-36,21	35,39	0,21	9,17	-44,97	38,93	-0,03	6,85
EIGEN-CG03C	-36,66	34,51	-0,11	8,99	-44,22	39,74	0,00	6,75
EIGEN-GLO4C	-36,02	34,53	-0,11	8,98	-44,58	40,44	0,00	6,74
ГАО-2008	-40,26	37,43	-0,12	9,12	-45,93	46,21	0,00	7,05
EIGEN-5C	-35,47	34,88	-0,04	8,98	-44,92	39,65	0,00	6,73
GGM-03C	-35,47	34,72	0,04	8,98	-44,77	40,40	0,00	6,80
GOCE-DIR(3)	-38,54	37,13	-0,48	9,45	-48,21	40,11	0,02	6,89
GOCE-TIM(3)	-35,71	34,70	0,20	9,38	-47,90	40,23	0,01	6,88
GOCO02S	-37,68	35,64	0,18	9,34	-48,04	40,22	-0,01	6,91
EIGEN-6C	-37,60	35,73	-0,02	8,68	-33,90	36,50	0,00	6,56
GIF48	-35,34	35,50	0,05	8,94	-43,84	38,65	0,00	6,70
ГАО2012	-39,73	39,57	-0,14	9,14	-42,25	40,03	0,01	6,98
Отечественные	-38,25	36,62	-0,05	9,15	-44,32	41,66	0,02	6,97
Зарубежные	-36,58	35,69	0,06	9,12	-44,02	40,07	0,00	6,83
Спутниковые	-37,31	35,82	-0,03	9,39	-48,05	40,19	0,01	6,89
Комбинированные	-36,96	35,97	0,05	9,06	-43,11	40,57	0,01	6,86
Низкостепенные	-36,93	35,71	0,00	9,14	-45,30	40,41	0,01	6,86
Высокостепенные	-37,67	37,45	0,22	9,05	-36,28	41,08	-0,01	6,91
До 2005 года	-36,74	36,18	0,25	9,23	-43,23	41,32	0,01	7,02
После 2005 года	-37,13	35,85	-0,05	9,09	-44,41	40,20	0,00	6,82

Детальное представление об изменчивости АГПЗ могут дать профили модельных значений составляющих УОЛ (см. профили, показанные на рис. 2, 3). Они являются иллюстрацией того, что в Арктике, несмотря на относительную умеренность АГПЗ по сравнению, например, с районом Охотского моря, имеются участки с достаточно резкими колебаниями УОЛ по частоте и по амплитуде, причем интенсивность этих колебаний повышается как с удалением от полюса, так и с увеличением размерности модели. Размах значений УОЛ, вычисленных по модели EGM-2008, составляет:

по ξ : от $72,8''$ в Ω_0 до $92,8''$ в Ω_1 ;

по η : от $83,9''$ в Ω_0 до $91,1''$ в Ω_1 .

По данным этой же модели в целом по земному шару ξ и η меняются в пределах соответственно 219 и 174'' (в системе ПЗ-90.02).

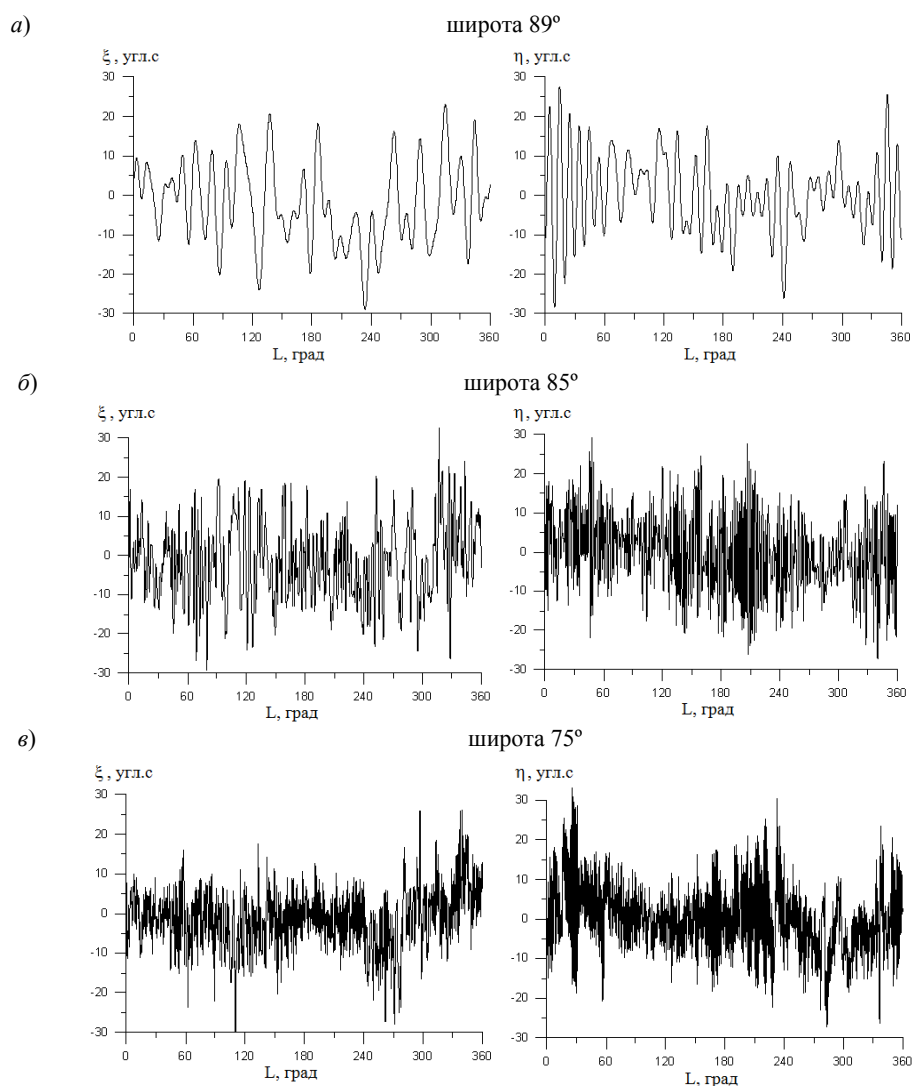


Рис. 2. Профили составляющих УОЛ ξ, η по данным модели EGM2008

Для того чтобы оценить, насколько эти колебания соответствуют действительности, целесообразно провести сравнение модели EGM-2008 в Арктике с

фактическими значениями параметров АГПЗ, полученными по измерительной информации (гравиметрической, альтиметрической). Для этого необходимо создать соответствующую базу данных о параметрах АГПЗ в Арктике. В настоящее время эта задача решается специалистами ИФЗ РАН и ЦНИИГАиК.

Сопоставление рис. 2 и 3 позволяет судить о зависимости модельных значений УОЛ в Арктике от ранее недоступной ультравысокочастотной части геопотенциала. Легко видеть, насколько значения составляющих УОЛ, вычисленные по модели EIGEN-6C с разрешением на уровне 15', являются сглаженными по сравнению с моделью EGM-2008, имеющей более высокое разрешение (10'). В данном случае степень сглаженности вполне вписывается в рамки известного из практики вычисления УОЛ по интегральным формулам геодезической гравиметрии факта, заключающегося в том, что наибольший вклад в значения УОЛ на уровне 80–90% вносят АСТ ближней и особенно центральной зоны, где они задаются с детальностью 5' и выше.

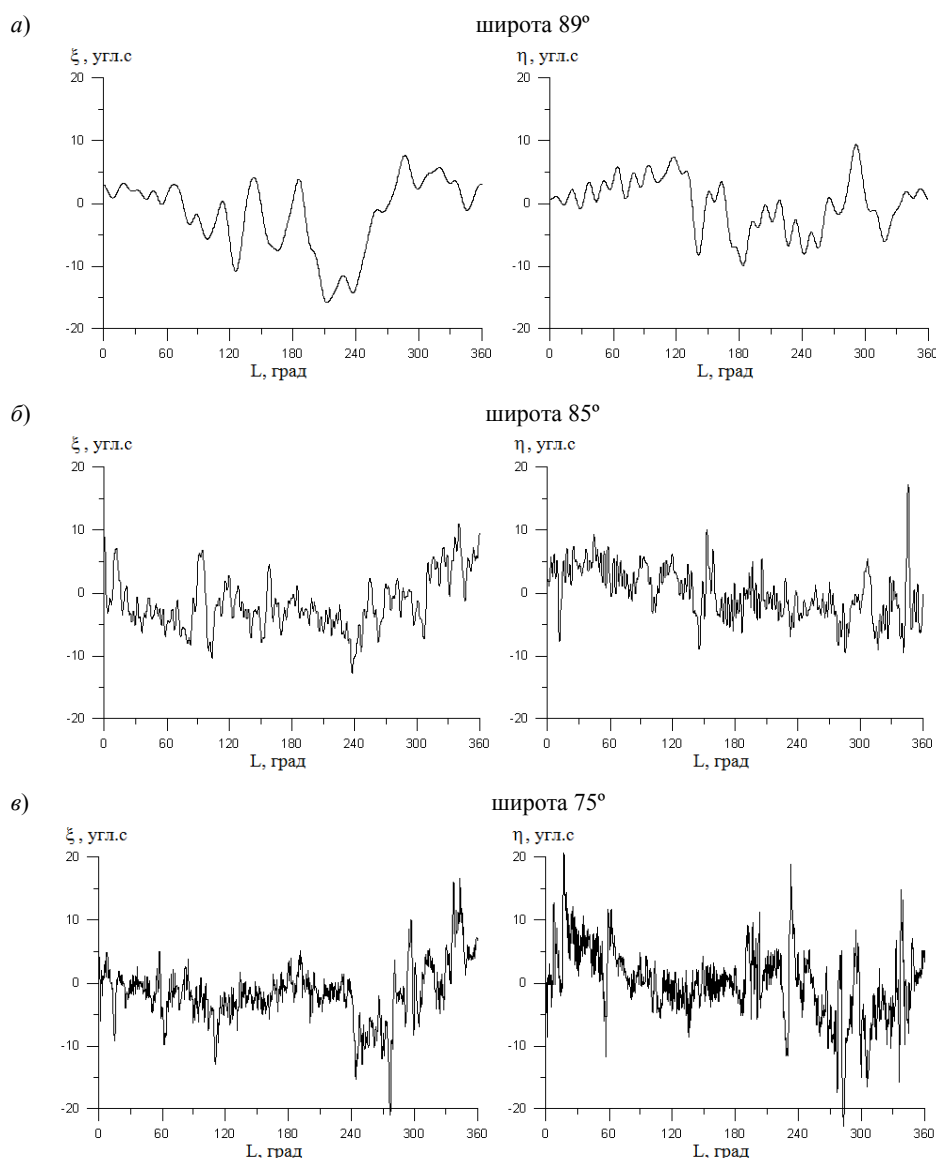


Рис. 3. Профили составляющих УОЛ ξ, η по данным модели EIGEN-6C

Однако выявленное соотношение сглаженности представления УОЛ моделями различной разрешающей способности не является безусловным. Например, высокостепенная модель GPM98A, разрешающая способность которой формально составляет 12', по гладкости, как видно из табл. 2–5, находится на уровне низкостепенных моделей. Вероятно, это обусловлено тем, что данная модель создавалась как согласующая модель для территории Европы, следствием чего стал её определенный «перекос» в Арктике и других районах [6].

Таблица 5

Статистические характеристики отклонений модельных значений η -компоненты УОЛ от «эталонных» значений, угл. с

Модель	Ω_0				Ω_1			
	min	max	μ	σ	min	max	μ	σ
EGM-96	-40,78	43,38	0,00	9,71	-42,95	40,12	0,00	6,64
ГАО-98	-40,25	40,65	0,00	9,49	-36,84	37,59	0,00	6,65
GPM-98	-40,60	44,23	0,00	9,84	-39,96	41,31	0,00	6,77
ПЗ-2002/360	-39,66	43,48	0,00	9,69	-41,17	37,16	0,00	6,53
EIGEN-CG03C	-37,08	40,34	0,00	9,25	-37,64	36,75	0,00	6,40
EIGEN-GLO4C	-36,86	40,70	0,00	9,24	-37,33	37,00	0,00	6,40
ГАО-2008	-38,85	42,10	0,00	9,53	-42,16	37,40	0,00	6,82
EIGEN-5C	-36,91	40,82	0,00	9,24	-37,42	37,32	0,00	6,39
GGM-03C	-37,34	40,53	0,00	9,21	-37,41	36,89	0,00	6,39
GOCE-DIR(3)	-38,73	41,62	0,00	9,67	-36,06	35,54	0,00	6,58
GOCE-TIM(3)	-41,00	42,58	0,00	9,81	-36,52	36,52	0,00	6,58
GOCO02S	-42,22	41,36	0,00	9,54	-36,54	36,03	0,00	6,61
EIGEN-6C	-37,19	39,82	0,00	9,09	-32,12	33,86	0,00	6,24
GIF48	-36,61	39,96	0,00	9,24	-38,32	37,01	0,00	6,39
ГАО-2012	-38,46	40,79	0,00	9,59	-41,69	37,14	0,00	6,73
Отечественные	-39,31	41,76	0,00	9,58	-40,47	37,32	0,00	6,68
Зарубежные	-38,67	41,39	0,00	9,44	-37,48	37,12	0,00	6,49
Спутниковые	-40,65	41,85	0,00	9,67	-36,37	36,03	0,00	6,59
Комбинированные	-38,38	41,40	0,00	9,43	-38,75	37,46	0,00	6,53
Низкостепенные	-38,83	41,41	0,00	9,48	-38,62	37,11	0,00	6,55
Высокостепенные	-38,90	42,03	0,00	9,47	-36,04	37,59	0,00	6,51
До 2005 года	-40,32	42,94	0,00	9,68	-40,23	39,05	0,00	6,65
После 2005 года	-38,30	40,97	0,00	9,40	-37,56	36,50	0,00	6,50

Таким образом, эффект сглаживания модельных значений УОЛ (см. рис. 2, 3) является подтверждением того, что характеристики АГПЗ (в данном случае в Арктике) зависят не только от района, но и от используемой модели геопотенциала.

Анализируя табл. 2, 3, отметим, что последнее подтверждается разбросом оценок величин μ , σ , min, max на множестве исследуемых моделей, особенно

граничных значений, меняющихся в пределах от 27 до 30" для ξ и от 26 до 35" для η . В силу недостаточной изученности АГПЗ в районе полярной шапки расхождения между моделями по УОЛ возрастают при переходе из зоны Ω_1 в зону Ω_0 , что соответствует модельным значениям ВКГ и АСТ [2].

В результате проведенного анализа межгрупповых различий наибольшие расхождения в УОЛ выявлены между низкостепенными и высокостепенными, а также между спутниковыми и комбинированными моделями, что идентично особенностям межгрупповых различий между теми же моделями по АСТ [2]. В обоих случаях эти расхождения связаны с тем, в какой степени при выводе моделей использовалась детальная исходная информация (гравиметрическая, альтиметрическая), даже с учетом неполного покрытия этой информацией районов Арктики. Межгрупповые расхождения между моделями, созданными до и после 2005 года, менее значительны. Вероятно, это обусловлено ограниченными возможностями спутниковых данных, в том числе полученных с использованием новых методов космической геодезии, в плане уточнения высокочастотной части спектра геопотенциала по сравнению с детальной гравиметрической и альтиметрической информацией. Что касается межгрупповых различий между отечественными и зарубежными моделями, то их уменьшению способствовало включение в состав исследуемых моделей новой отечественной модели ГАО-2012. Использование этой модели представляет интерес не только с точки зрения влияния на межгрупповые различия, но и в плане различий между моделями одной группы. Полученные сравнительные оценки указывают на отсутствие существенных отличий этой модели от ранее созданной отечественной модели ГАО-2008, например в части УОЛ в высокоширотных районах. Расхождения этих моделей в зонах Ω_0 и Ω_1 характеризуются практически нулевыми средними значениями и стандартными отклонениями, соответственно 1,05 и 1,11" для ξ -компоненты; 1,52 и 1,28" для η -компоненты.

Следуя работе [2], статистические характеристики величин $\delta\xi$ и $\delta\eta$ рассматривались как характеристики точности моделей АГПЗ в отклонениях модельных значений составляющих УОЛ от соответствующих «эталонных» значений. Сопоставление этих оценок с аналогичными оценками, приведенными в работе [2], показало, что они также варьируются и в зависимости от региона, причем в зоне Ω_0 погрешности аппроксимации «эталонных» УОЛ, как правило, больше, чем в зоне Ω_1 , и в зависимости от аппроксимирующей модели геопотенциала. При этом коэффициент $k = \sqrt{\sigma_{\delta\xi}^2 + \sigma_{\delta\eta}^2} / \sigma_{\delta g}$, где δg – погрешность аппроксимации «эталонных» АСТ, оценивается следующими значениями:

0,2047...0,2066 в зоне Ω_0 ;

0,2097...0,2100 в зоне Ω_1 .

Эти оценки хорошо согласуются с его теоретическим значением [7].

Полученные в данной работе статистические характеристики величин $\delta\xi$, $\delta\eta$ расширяют представление о том, насколько хорошо модели более низкой степени, в том числе новая модель ГАО-2012, аппроксимируют ультравысокостепенную модель геопотенциала EGM2008 в районах Арктики. Наилучшие показатели у высокостепенной модели EIGEN-6C до 1420-й степени, стандартные отклонения которой по ξ и η составили соответственно 8,68 и 9,09" в зоне Ω_0 ; 6,56 и 6,24" в зоне Ω_1 , что существенно превосходит аналогичные показа-

тели другой высокостепенной модели GPM-98A. При этом показатели низкостепенных моделей улучшены примерно на $0,15 \dots 0,30''$.

Рассматривая тенденции, выделим улучшение точностных характеристик определения УОЛ с использованием моделей, выпущенных после 2005 года. По сравнению с моделями, созданными в предшествующие годы, расхождения этих моделей с «эталонными» значениями составляющих УОЛ уменьшились в среднем на $0,2''$ по стандартным отклонениям и на $1,5''$ по граничным значениям.

Основной вклад в отмеченное улучшение внесли комбинированные модели, в том числе модели EIGEN-GLO4C, EIGEN-5C, GIF48 до 360-й степени и особенно модель EIGEN-6C. Среди низкостепенных моделей наименьшие отклонения от «эталонных» значений составляющих УОЛ имеет выпущенная в 2011 году американская модель GIF48. Она же была отмечена ранее как модель с наименьшими в этой группе погрешностями аппроксимации «эталонных» значений ВКГ и АСТ [2].

Использование новой отечественной модели ГАО-2012 несколько улучшило отечественные модели, однако назвать это улучшение заметным шагом в плане повышения точности определения УОЛ в Арктике было бы не вполне правильным, особенно по сравнению с последними зарубежными моделями. Основное внимание уделялось использованию данных спутниковой градиентометрии, что в силу относительно низкой разрешающей способности этих данных не позволило уточнить сферические гармоники геопотенциала высоких порядков. Также отмечалось неполное покрытие данными спутниковой градиентометрии района полярной шапки, обусловленное тем, что спутник GOCE с установленным на нем градиентометром имел орбиту с наклоном $96,7^\circ$. С другой стороны, точность аппроксимации ВКГ в этом районе была наиболее высокой, что также можно связать с использованием данных спутниковой градиентометрии. Это означает, что требования к полноте покрытия полярной шапки низкоорбитальными спутниковыми измерениями с точки зрения вычисления ВКГ могут быть менее жесткими, чем с точки зрения вычисления УОЛ.

В итоге по причине недостаточной полноты и недостаточной чувствительности спутниковых данных к локальным гравитационным аномалиям спутниковые модели (GOCE-DIR, GOCE-TIM, GOCO02S) в целом уступают комбинированным моделям геопотенциала, в том числе низкостепенным, по точности представления быстроменяющихся параметров АППЗ, таких как АСТ и УОЛ, особенно в районе полярной шапки. Что касается остальных высокоширотных районов, то в них различие между спутниковыми и комбинированными низкостепенными моделями является менее выраженным, что можно интерпретировать и как результат использования новых методов космической геодезии, реализованных в низкоорбитальных измерительных системах GRACE и GOCE.

Об эффективности этих методов можно судить, например, по модели ПЗ-2002/360 до 360-й степени. Известно, что модель ПЗ-2002/360 получена на основе спутниковой модели ($N=70$) путем ее уравнивания со средними АСТ по трапециям $30 \times 30'$ [8]. Однако в силу погрешностей исходных АСТ точность определения гармоник высших порядков оказалась недостаточно высокой, вслед-

ствие чего по степени близости к «эталонным» значениям УОЛ эта модель незначительно превосходит новую спутниковую модель GOCE-DIR меньшей детальности ($N=240$), но более высокой спектральной точности, а по ВКГ заметно уступает последней, особенно в зоне Ω_1 [2].

Таким образом, в данной работе продолжено сравнительное исследование современных глобальных моделей АГПЗ в районах Арктики в соответствии с намеченной программой [2], а именно получены и исследованы модельные данные, отражающие современное представление об особенностях уклонений отвесных линий в районах высоких широт. При этом число исследуемых моделей увеличено за счет добавления новой, недавно полученной российской модели ГАО-2012 ($N=360$).

Выводы

1. Выполненные с использованием различных моделей геопотенциала (от ультравысокостепенной комбинированной модели EGM-2008 до низкостепенных спутниковых) эксперименты по вычислению и статистическому анализу УОЛ в районах Арктики расширяют общее представление о вертикальной расчлененности и трендах АГПЗ в зависимости от их географического положения и от используемой модели (группы моделей). Полученные при этом статистические характеристики отклонений исследуемых моделей от «эталонной» модели EGM-2008 по УОЛ согласуются с аналогичными характеристиками для АСТ и могут служить дополнительными оценками достоверности глобальных моделей АГПЗ в районах высоких широт [2].

2. Проведенное сравнение значений составляющих УОЛ и их статистических характеристик, вычисленных по различным моделям геопотенциала, в том числе по спутниковым и комбинированным, низкостепенным и высокостепенным, и представленных в числовом и графическом виде, позволяет судить о сложности гравитационного поля в Арктике, зависимости градиентов аномального геопотенциала от различных факторов, таких как аномальность районов, особенности используемых расчетных моделей АГПЗ, включая их детальность, состав исходной информации и методы ее обработки.

3. Ближе к «эталонным» значениям УОЛ относится новая высокостепенная модель EIGEN-6C ($N=1420$), а в категории низкостепенных ($N \leq 360$) – модели EIGEN5C и GIF48. С учетом результатов работы [2] они могут быть рекомендованы для использования в качестве основы при создании детальных цифровых карт УОЛ в Арктике по данным гравиметрических съемок. Новая модель ЦНИИГАиК ГАО-2012 благодаря использованию при ее выводе данных спутниковой градиентометрии позволила приблизить отечественные разработки к уровню лучших зарубежных аналогов практически на всем протяжении арктической области, за исключением района полярной шапки, где она не показала улучшения по сравнению с предшествующей моделью ГАО-2008, подтверждая тем самым, что в этом районе вклад спутниковых данных является минимальным.

4. С точки зрения расхождений между моделями район полярной шапки остается одним из проблемных районов Арктики, что в значительной мере обусловлено недостатком исходной информации. Фактически, единственная на сегодняшний день возможность существенного улучшения глобальных моделей

АГПЗ по точности восстановления детальной характеристики в этом и других районах Арктики связана с объединением усилий организаций и стран, в том числе России, выполняющих детальные аэрогравиметрические съемки в высоких широтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов, В.Г.** Судовые средства измерения параметров гравитационного поля Земли: Обзор по судостроительной технике / В.Г.Пешехонов, Л.П.Несенюк, Л.П.Старосельцев.- Л.: ЦНИИ «Румб», 1989. – 29 с.
2. **Конешов, В.Н.** Исследование аномального гравитационного поля в Арктике по данным современных моделей геопотенциала / В.Н.Конешов, В.Б.Непоклонов, И.А.Столяров // Физика Земли.-2012.-№7-8 (в печати).
3. **Демьянов, Г.В.** ГЛОНАСС и геодезия / Г.В.Демьянов, А.Н.Майоров, Г.Г.Побединский // Вестник ГЛОНАСС. – 2012. - № 1 (4). – С. 48-53.
4. **Мориц, Г.** Современная физическая геодезия / Пер. с англ. - М.: Недра, 1983.- 392 с.
5. **Rummel R., Balmino G., Johnhannessen J., Visser P., Woodworlh, P.** Dedicated gravity field missions - principles and aims // Journal of Geodynamics. 2002. Vol. 33. P. 3-20.
6. **Amos M.J., Featherstone W.E.** Comparisons of recent global geopotential models with terrestrial gravity field data over New Zealand and Australia // Geomatics Research Australasia. – 2003. No. 78 June. - P. 67-84.
7. **Молоденский, М.С.** Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли / М.С.Молоденский, В.Ф.Еремеев, М.И.Юркина /Тр. ЦНИИГАиК, вып. 131. – М.: Геодезиздат, 1960. – 251 с.
8. **Непоклонов, В.Б.** Вопросы разработки и применения систем компьютерного моделирования для глобальных исследований гравитационного поля Земли / В.Б.Непоклонов, А.Н.Зуева, Д.И.Плешаков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 2. – С. 79-97.

Abstract. The article continues the analysis of the results of modeling of the anomalous Earth gravity field in high-latitude areas, causing the interest from the point of view of the development of the Arctic. We investigated the structure and accuracy of the deflections of the vertical in the Arctic. The study was carried out with the use of 16 modern Russian and foreign models of spherical harmonics of the Earth gravity potential, including ultrahigh-degree EGM-2008 model, the first models created on the basis of satellite gradiometry data, and the latest Russian model GAO-2012.

Key words: Arctic, anomaly, Earth gravity field, model, spherical harmonics, deflection of the vertical

Материал поступил 26.04.12