

УДК 550.312, 550.8.02, 550.83.043

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО СОВРЕМЕННЫМ МОДЕЛЯМ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2016 г. В.Н. Конешов<sup>1</sup>, В.Н. Соловьев<sup>1</sup>, В.В. Погорелов<sup>1</sup>, В.Б. Непоклонов<sup>1,2</sup>, Л.В. Афанасьева<sup>1</sup>, М.Н. Дробышев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), г. Москва, Россия

Для оценки погрешностей аномалий силы тяжести, определенных по современным глобальным моделям гравитационного поля Земли, на территории России сотрудниками лаборатории гравиинерциальных измерений ИФЗ РАН в 2013–2014 гг. отработана серия протяженных трансконтинентальных аэрогравиметрических профилей. По материалам измерений, выполненных в 2014 г. на 23 галсах при проведении аэрогравиметрических работ по маршруту от Сыктывкара до Петропавловска-Камчатского, оценена согласованность современных моделей гравитационного поля Земли и получена оценка их достоверности для ряда труднодоступных районов России.

Показано, что измерения на протяженных профилях могут быть использованы для оценки региональных погрешностей трансформант (производных) аномального гравитационного потенциала современных глобальных моделей гравитационного поля Земли.

**Ключевые слова:** аэрогравиметрия, модели гравитационного поля Земли, аномалии силы тяжести, аэрогравиметрические измерения, протяженные профили, Россия.

### Введение

Решение целого ряда практических и фундаментальных задач, таких как уточнение фигуры Земли, изучение ее глубинного строения, выявление геотектонических структур и плотностных неоднородностей, расчет уклонов отвесной линии для внесения поправок при работе инерциальных навигационных систем, требует обеспечения современными данными об аномалиях силы тяжести в исследуемых регионах. Развитие методологии и тенденция повышения детальности глобальных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ), создаваемых на основе данных спутниковой альтиметрии, гравиметрии и градиентометрических измерений, делают модели ГПЗ мощным инструментом для оценки региональных особенностей геопотенциала [Косенко, 2015]. Известно, что качество спутниковых измерений значительно ухудшается в приполярных районах, что связано с наклонением орбит соответствующих космических аппаратов (см., например, [Forsberg et al., 2011]). В связи с этим возникает необходимость дополнения спутниковых данных результатами измерений, выполненных другими (подспутниковыми) гравиметрическими методами – наземными/ледовыми, методами и аэро- и морской гравиметрии.

Оценка достоверности той или иной модели ГПЗ непосредственно для какой-либо изучаемой области возможна также при проведении гравиметрических исследований регионального масштаба (см., например, [Forsberg et al., 2011; Featherstone, 2010; Могилевский, Павлов, 2009а; Конешов, Непоклонов, Соловьев, 2014]). Практический интерес при этом во многом связан с потенциальной возможностью применения аномалий

силы тяжести и других характеристик геопотенциала, рассчитанных по глобальным моделям ГПЗ, например, для уравнивания материалов различных съемок и учета поля так называемой “дальней зоны”, обусловленного влиянием гравитирующих масс, аномалии которых имеют более значимый период, а также аномалий, создаваемых объектами, находящимися за пределами исследуемой области.

В последние два десятилетия появился целый ряд современных моделей ГПЗ, основанных на данных альтиметрии и спутниковых градиентометрических измерений, полученных спутниковыми миссиями *CHAMP*, *GRACE*, *GOCE* и др. [Balmino et al., 1999; Ключиков, 2015; Нейман, Сугаинова, 2015]. Методы спутниковых наблюдений позволяют исследовать особенности геопотенциала в низко- и среднечастотном спектрах гармоник. По результатам оценок точностных характеристик низкостепенных моделей ГПЗ наиболее предпочтительной представляется американская комбинированная модель *GIF48* [Конешов, Непоклонов, Столяров, 2012б; Конешов, Непоклонов, Соловьев, 2014]. В отношении представления аномалий гравитационного поля в Арктике на сегодняшний день лучшими отечественными моделями являются ГАО-2008 [Непоклонов, 2009] и более поздняя ГАО-2012 [Конешов, Непоклонов, Столяров, 2012б]. Как показывает пример европейских моделей *GOCE-TIM* и комбинированных моделей *GOCO01S/GOCO02S* [Bouman, Fuchs, 2012], созданных на основе спутниковых данных *GOCE* и *GRACE*, перспективы дальнейшего повышения точности моделей такого класса связаны с использованием данных спутниковой градиенто- и альтиметрии [Конешов, Непоклонов, Столяров, 2012а], а также с созданием комбинированных моделей ГПЗ на основе современных более точных моделей топографии с использованием разложений геопотенциала в ряд с высокими степенями гармоник (до 2190) [Hirt et al., 2016]. Несмотря на повышение разрешающей способности методов обработки спутниковой информации, глобальные модели, основанные на спутниковых данных и комплексных подспутниковых измерениях, могут содержать региональные погрешности [Bouman, Fuchs, 2012] и, очевидно, менее всего достоверны для широт 85–90°.

Новые комбинированные глобальные модели ГПЗ представляются рядом сферических гармоник геопотенциала с разрешением по длинам волн геоида на уровне 100 км и выше. В их число входят высокодетальные модели *EGM2008* ( $n=2190$ ), *EIGEN-6C* ( $n=1440$ ), *EIGEN-6C2* и *EIGEN-6C3* ( $n=1949$ ), *EIGEN-6C4* ( $n=2190$ ) [Förste et al., 2014] и *GECO2014* ( $n=2190$ ), где  $n$  – максимальный номер учитываемых гармоник [Gilardoni et al., 2013; *GOCE-EGM2008 combined...*, 2014].

При создании цифровых моделей аномалий гравитационного поля, учитывающих высокостепенные сферические гармоники геопотенциала, возникает необходимость их верификации с использованием априорных гравиметрических данных надлежащей точности [Непоклонов, 2009]. Это связано с определенными трудностями, обусловленными, в частности, недостаточной детальностью изученности многих районов земного шара и недоступностью части материалов гравиметрических съемок.

В ряде работ последних лет, посвященных уточнению разрешающей способности глобальных моделей ГПЗ, наряду с их сопоставлением с данными модели *EGM2008* [Pavlis et al., 2012] активно проводится сравнение модельных данных с результатами аэрогравиметрических измерений. Так, в [Förste et al., 2014] сравниваются модельные значения ГПЗ с результатами аэрогравиметрических измерений, выполненных над территорией Италии (~59 000 точек сравнения). Съемка проводилась на постоянной высоте полета по прямолинейным профилям длиной ~1000 км и по ортогональным им секционным профилям длиной ~250 км; всего было выполнено 7065 пог. км профилей. Показано, что среднеквадратические отклонения (СКО) по всем пунктам достигают 2.50 мГал для модели *EIGEN-6C4* и 2.55 мГал для модели *EGM2008* (средние отклонения составляют порядка  $\pm 7$  мГал при максимальных отклонениях –13.5 мГал для

первой из рассматриваемых моделей и 9.7 мГал для второй). Таким образом, даже для средних широт расхождение между измеренными и модельными значениями может не быть систематическим и обуславливаться особенностями глубинного строения земной коры. Очевидно, что невозможно обеспечить повсеместное достаточное покрытие современными аэрогравиметрическими данными.

Метод спутниковой альтиметрии также не может в полной мере компенсировать отсутствия гравиметрической информации, поскольку он “не работает” на суше, его невозможно использовать в высокоширотных районах Мирового океана, а по разрешающей способности он уступает гравиметрическим съемкам, выполненным другими методами [Дробышев и др., 2009; Могилевский, Павлов, 2009б; Forsberg et al., 2011]. По оценкам ряда авторов (см., например, [Могилевский и др., 2006; Могилевский, Каплун, Павлов, 2009; Childers et al., 2001]), применение данных наземных/ледовых съемок, выполненных в 1980–1990-е гг., может вызвать серьезные проблемы при уравнивании результатов наземных площадных съемок разных лет, так как на границах отснятых площадей при их объединении и приведении к единой системе нередко появляются особенности.

Насколько точны современные высокостепенные модели ГПЗ для территории России? Как по ним проверить достоверность аномалий силы тяжести при недостаточном покрытии съемкой всей интересующей исследователя площади? – Ответы на эти вопросы можно получить, проводя аэрогравиметрические исследования, ставшие в последние годы перспективными для экспериментальной оценки точности современных моделей гравитационного поля Земли благодаря высокой производительности и достигнутым успехам в развитии методической и приборно-измерительной базы.

### Аэрогравиметрические исследования на протяженных профилях

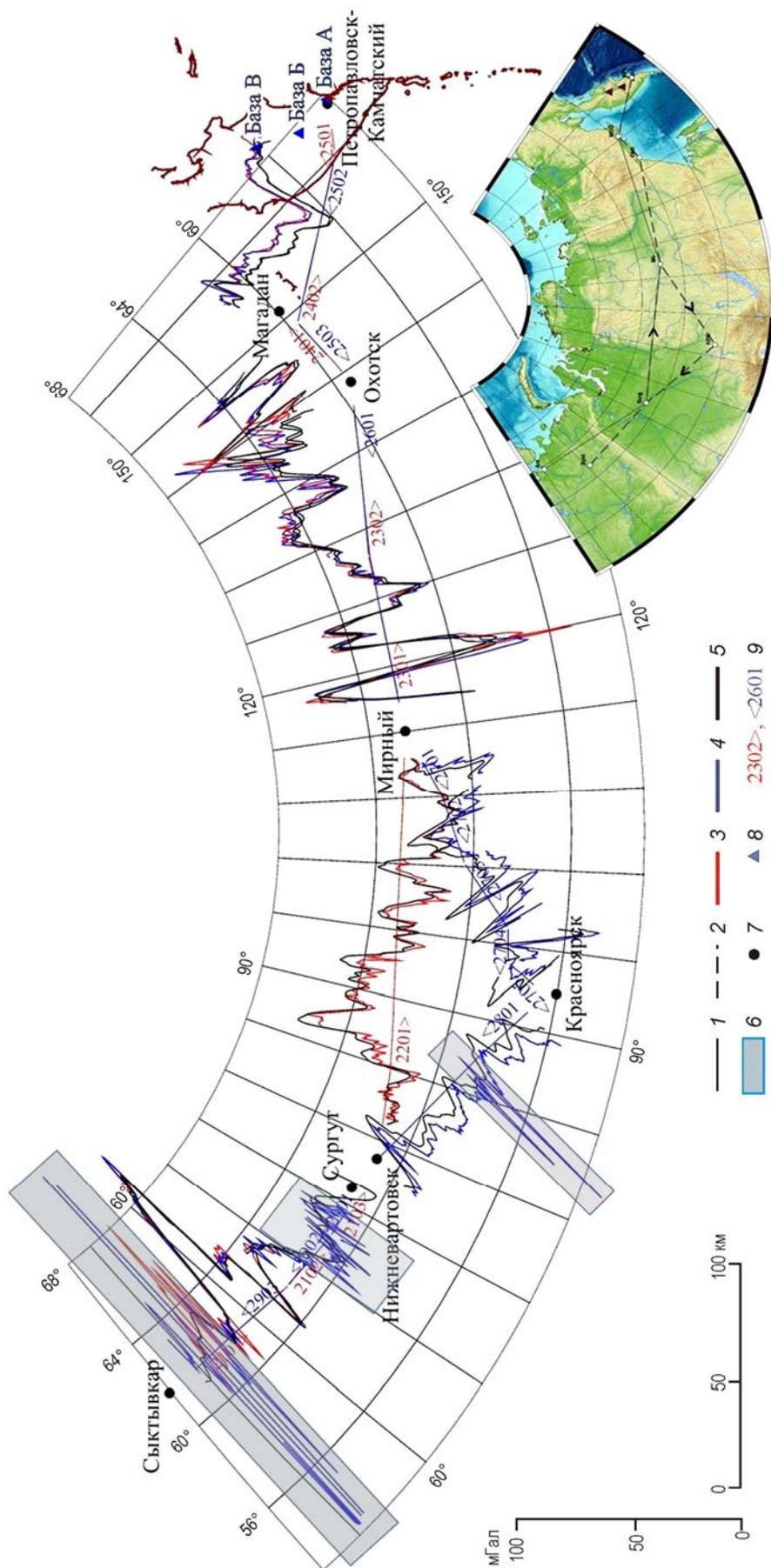
В 2013 и 2014 гг. сотрудниками лаборатории гравиинерциальных измерений ИФЗ РАН было выполнено несколько протяженных трансконтинентальных аэрогравиметрических профилей (рис. 1, врезка) по маршрутам Архангельск–Петропавловск-Камчатский (2013 г.) [Конешов, Непоклонов, Соловьев, 2014; Конешов и др., 2014б] и Сыктывкар–Петропавловск-Камчатский (2014 г.). Последний маршрут (рис. 1) включает 23 участка (галса), разбивка на которые обусловлена маневрами или промежуточными посадками. Измерения выполнялись с борта самолета-лаборатории [Дробышев и др., 2008, 2009, 2011] тремя российскими аэрогравиметрическими комплексами (АГК) типа *GT 1A/2A* [Гравиметр ..., 2011; Бержицкий и др., 2002; Абрамов, Конешов, 2014] на высотах, рекомендуемых для безопасных авиационных эшелонов. Средняя высота измерений на перелетах между аэропортами составляла  $5150 \pm 500$  м.

Оценка точности гравиметрических измерений проводилась путем анализа межприборной разности данных всех трех АГК на каждом пункте измерений по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_i^2 / N}$$
, где  $\delta$  – среднеквадратичная погрешность аномалий силы тяжести по измерениям тремя АГК в каждом пункте;  $N$  – количество пунктов измерений.

Для измеренных значений аномалий силы тяжести по всем 90382 пунктам на 23 галсах СКО составило 1.2 мГал. При этом на 9 галсах (35489 пунктов) усредненные по ним отклонения не превышали 1.0 мГал; на 4 галсах (11207 пунктов) были  $>1.5$  мГал. Анализ межприборной разности проводился без выполнения процедуры дополнительной фильтрации результатов измерений фильтром Фрейзера и без отбраковки измерений АГК, имеющих значительные отклонения от среднего значения на пункте сравнения.

Для координатной привязки измерений применялись высокоточные двухчастотные *GPS*-приемоиндикаторы *JAVAD*. В отличие от работ 2013 г. [Конешов и др., 2014б]



**Рис. 1.** Трансконтинентальный профиль Сыктывкар–Петропавловск-Камчатский, на котором в 2014 г. ИФЗ РАН были выполнены аэрогравиметрические измерения, и графики аномалии силы тяжести вдоль него в редукции в свободном воздухе (АСВ), построенные на 23 галсах 1, 2 (на врезке) – маршруты перелетов 2013 г. (1) и 2014 г. (2); 3, 4 – галсы и графики АСВ по маршруту Сыктывкар–Петропавловск-Камчатский (перелет в направлении на восток, 3) и по маршруту Петропавловск-Камчатский–Сыктывкар (перелет в направлении на запад, 4); 5 – аномалии ГПЗ, рассчитанные на высоте полета по модели EGM2008; 6 – базовые станции КФ ГС РАН в г. Петропавловск-Камчатский (А), гидропункт Верхнекамчатский (Б), сейсмостанция “Козыревск” (В); 9 – номера галсов с указанием направления движения самолета-лаборатории при съемке (стрелки). Слева внизу по горизонталю графической масштаба схемы, по вертикали – графической масштаб графиков АСВ

съемка 2014 г. позволила оценить возможность использования удаленных наземных базовых станций для коррекции навигационной информации на этапе постобработки.

Процедура исследований на протяженных профилях имела два существенных отличия от технологии площадных съемок.

Во-первых, измерения на профилях не позволяют провести процедуру уравнивания материалов съемки из-за отсутствия повторных, встречных и секущих галсов. Кроме того, маршруты перелетов не проходили над территориями полигонов или площадей, на которых ранее были выполнены аэрогравиметрические или морские съемки. Таким образом, оценка качества гравиметрических измерений была возможна только по внутренней сходимости трех АГК. Некоторые перелеты пролегали по близким маршрутам, что позволило качественно оценить соответствие измерений на них.

Во-вторых, поскольку коррекция позиционирования с использованием стационарных наземных базовых станций *GPS* выполнялась на этапе постобработки по наземным наблюдениям на базовых станциях, расположенных на п-ове Камчатка [Конешов и др., 2014б], базовые линии имели значительную длину. Это потребовало проведения дополнительных исследований возможности использования результатов наземных измерений для коррекции определения положения подвижными приемниками на борту самолета [Погорелов, Соловьёв, Конешов, 2015]. В результате было показано, что положительный эффект от использования удаленных базовых станций наблюдается при длине базовых линий примерно до 3 тыс. км<sup>1</sup>. На участках трансконтинентальных перелетов, удаленных от базовых станций на большие расстояния, и на участках, где при аэрогравиметрических измерениях по техническим причинам не проводились наблюдения на наземных базовых станциях, для фильтрации аномалий применялся фильтр Фрейзера с шириной окна 210 с.

### Сравнение результатов аэрогравиметрических наблюдений с данными современных глобальных моделей ГПЗ

Методика оценки региональных погрешностей современных моделей гравитационного поля включала следующие операции.

1. При оценке региональных погрешностей современных моделей ГПЗ использовались аномалии силы тяжести в свободном воздухе (АСВ), значения которых определялись как средние по результатам измерений тремя АГК типа *GT 1A/2A*, выполненным на каждом из галсов [Конешов, Непоклонов, Соловьёв, 2014].

2. В связи с тем, что при обработке измерений отдельных гравиметров оказалось недостаточно фильтрации специальным фильтром Калмана с частотой среза 0.01 Гц, средние значения АСВ дополнительно сглаживались конволюционным фильтром низких частот, разработанным по методу Фрейзера [Fraser, Fuller, Ward, 1966]. Для полетов П. 1 (Сыктывкар – Нижневартовск) и П. 9 (Сургут – Сыктывкар), в которых АСВ были вычислены в стандартном режиме обработки навигационных данных, частота среза фильтра Фрейзера составляла 0.0048 Гц (ширина окна 210 с). Для остальных полетов АСВ были вычислены в дифференциальном режиме обработки навигационных данных, частота среза фильтра Фрейзера при этом составляла 0.0067 Гц (ширина окна 150 с).

3. В измеренные значения АСВ вводилась поправка за нормальный вертикальный градиент гравитационного поля, составляющая 0.3086 мГал/м. Поправка за аналитическое продолжение вниз не вводилась.

4. Расчеты модельных значений выполнялись с помощью модифицированной программы гармонического синтеза (ПГС), разработанной в ИФЗ РАН. В 2014 г. эти

<sup>1</sup> Этот вопрос авторы планируют более подробно обсудить в отдельной публикации.

вычисления проводились на пунктах галсов по их координатам и значениям высоты полета. Модифицированный вариант программы настроен на работу с глобальными моделями ГПЗ в формате \*.GFC, разработанном и введенном в обращение под эгидой Международного центра глобальных моделей Земли [Конешов, Непоклонов, Соловьев, 2014; Barthelmes, Förste, 2011].

В связи с тем, что АСВ, вычисленные по аэрогравиметрическим данным, были получены с нормальным полем Гельмерта “минус” 14 мГал, в значения модельных АСВ была введена поправка “минус” 14 мГал, обеспечивающая переход от международной формулы нормального поля к формуле Гельмерта.

5. Полученные на трансконтинентальном профиле значения АСВ сравнивались с модельными значениями для четырех современных моделей гравитационного поля Земли – *EGM2008* ( $n=2190$ ), *EIGEN-6C3* ( $n=1949$ ), *EIGEN-6C4* ( $n=2190$ ), *GECO2014* ( $n=2190$ ). Вычислялись невязки (разности) между измеренными и модельными значениями, по которым для отдельных галсов или групп галсов (полетов) определялись статистические параметры – среднее значение невязки и СКО. Статистическое сравнение измеренных и модельных значений АСВ приведено в таблице.

Статистическое сравнение измеренных и модельных значений АСВ

Полет	Кол-во галсов	Число пунктов сравнения	Модель <i>EGM2008</i> ( $N_{\max}=2190$ )		Модель <i>EIGEN-6C3</i> ( $N_{\max}=1949$ )		Модель <i>EIGEN-6C4</i> ( $N_{\max}=2190$ )		Модель <i>GECO2014</i> ( $N_{\max}=2190$ )	
			Средняя невязка, мГал	СКО, мГал	Средняя невязка, мГал	СКО, мГал	Средняя невязка, мГал	СКО, мГал	Средняя невязка, мГал	СКО, мГал
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перелет Сыктывкар – Петропавловск-Камчатский и обратно	по всем 23 галсам	90382	-0.25	±7.46	+0.06	±7.48	+0.04	±7.45	-0.12	±7.39
Перелет Сыктывкар – Петропавловск-Камчатский (на восток)	9 галсов	41323	+1.53	±6.51	+1.77	±6.52	+1.76	±6.50	+1.58	±6.40
Перелет Петропавловск-Камчатский – Сыктывкар (на запад)	14 галсов	49059	-1.75	±7.87	-1.38	±7.92	-1.41	±7.89	-1.56	±7.85
П. 1: полет 140910а Сыктывкар – Нижневартовск	по 3 галсам	8383	-2.14	±3.81	-1.86	±3.72	-1.91	±3.78	-2.09	±3.73
	2101	3883	+0.50	±3.67	+0.86	±3.28	+0.81	±3.37	+0.64	±3.38
	2102	3066	-4.11	±1.61	-3.76	±1.79	-3.98	±1.64	-3.77	±1.81
	2103	1434	-5.06	±2.69	-5.15	±2.57	-5.30	±2.61	-5.44	±2.41
П. 2: полет 140910б Нижневартовск – Мирный	1 галс 2201	13894	-2.46	±2.70	-2.89	±2.73	-2.84	±2.79	-2.77	±2.59
П. 3: полет 140911 Мирный – Охотск	по 2 галсам	10590	3.62	±7.13	4.38	±6.52	4.36	±6.47	4.44	±6.74
	2301	5028	-0.67	±6.53	+0.24	±5.81	+0.25	±5.80	+0.04	±5.84
	2302	5562	+7.51	±5.16	+8.12	±4.57	+8.07	±4.50	+8.42	±4.73
П. 4: полет 140912 Охотск – Петропавловск-Камчатский	по 3 галсам	8456	+9.12	±3.80	+9.77	±2.74	9.72	±2.68	+8.80	±3.38
	2401	1502	+10.31	±2.80	+9.24	±3.29	+9.49	±3.22	9.23	±3.06
	2402	5964	+7.68	±2.69	+9.24	±1.96	9.19	±2.05	+8.08	±2.97
	2403	990	+15.99	±2.51	+13.76	±2.54	+13.27	±2.47	12.48	±3.63
П. 5: полет 141016 Петропавловск-Камчатский – Охотск	по 3 галсам	9413	+7.58	±3.47	+8.22	±2.87	+8.17	±2.84	+7.42	±3.33
	2501	749	+14.07	±3.16	+11.79	±3.23	+11.41	±3.01	+11.79	±2.61
	2502	6050	+6.75	±2.73	+8.30	±2.07	+8.22	±2.22	+7.09	±2.96
	2503	2614	+7.64	±3.11	+7.02	±3.40	+7.12	±3.31	+6.94	±3.44
П. 6: полет 141017а Охотск – Мирный	1 галс 2601	11619	+2.25	±7.24	+2.95	±6.68	+2.92	±6.62	+3.01	±6.90
П. 7: полет 141017б Мирный – Красноярск	по 5 галсам	10313	-8.23	±2.60	-8.27	±2.58	-8.33	±2.52	-8.33	±2.61
	2701	1557	-7.26	±1.99	-7.77	±2.00	-7.64	±1.93	-7.52	±2.15
	2702	2920	-7.28	±2.63	-7.07	±2.31	-7.37	±2.27	-7.11	±2.29

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2703	3125	-9.23	±1.94	-8.87	±2.06	-9.05	±2.05	-9.17	±1.87
	2704	1375	-8.69	±1.26	-9.41	±1.46	-9.19	±1.42	-9.29	±1.28
	2705	1336	-8.69	±4.04	-8.87	±4.14	-8.64	±4.12	-8.96	±4.34
П. 8: полет 141018а Красноярск – Сургут	по 2 галсам	9632	-8.12	±5.23	-7.96	±5.32	-7.89	±5.30	-8.02	±5.33
	2801	9061	-8.36	±5.29	-8.24	±5.35	-8.17	±5.33	-8.33	±5.34
	2802	571	-4.29	±1.06	-3.47	±1.07	-3.42	±1.05	-3.06	±1.08
П. 9: полет 141018б Сургут – Сыктывкар	по 3 галсам	8082	-2.47	±4.33	-2.14	±4.19	-2.21	±4.23	-2.26	±4.17
	2901	1128	-5.93	±2.12	-5.72	±2.11	-6.03	±2.14	-5.51	±2.13
	2902	2547	-5.36	±2.82	-5.07	±2.89	-5.03	±2.87	-5.22	±2.73
	2903	4407	+0.09	±3.76	+0.47	±3.35	+0.41	±3.41	+0.29	±3.49

Примечание: в полетах П. 4 и П. 12 измерения обработаны только в стандартном режиме (без базовых станций).

Общее число пунктов сопоставления на перелете по маршруту Сыктывкар – Петропавловск-Камчатский и обратно составило 90382. Для четырех рассматриваемых моделей были получены следующие статистические оценки:

модель *EGM2008* – средняя невязка  $-0.25$  мГал, СКО =  $\pm 7.46$  мГал;

модель *EIGEN-6C3* – средняя невязка  $+0.06$  мГал, СКО =  $\pm 7.48$  мГал;

модель *EIGEN-6C4* – средняя невязка  $+0.04$  мГал, СКО =  $\pm 7.45$  мГал;

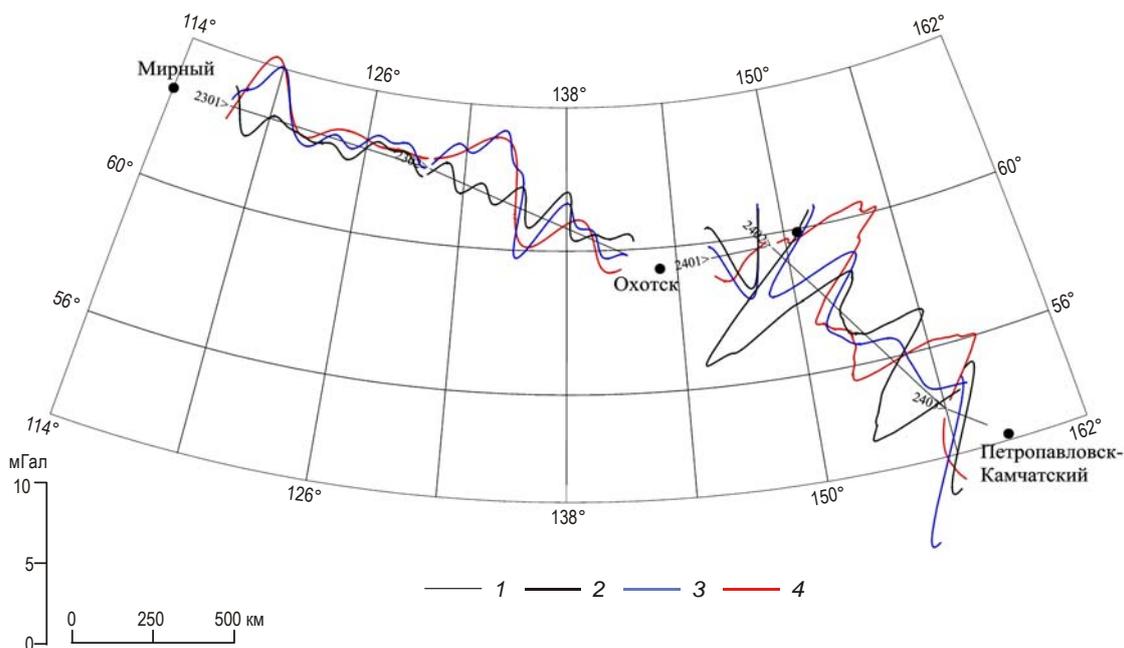
модель *GECO2014* – средняя невязка  $-0.12$  мГал, СКО =  $\pm 7.39$  мГал.

В связи с близостью значений приведенных оценок (в пределах точности измерений) отдельно были проанализированы разности модельных АСВ на каждом из 23 галсов. Выявлено, что современные модели имеют одинаковые спектры и незначительно отличаются по величине спектральных составляющих. Разница этих величин по территории России в основном находится в интервале  $-5 \dots +5$  мГал. В ряде районов, таких как переходные зоны, береговые линии и гористая местность, эта тенденция нарушается. На рис. 2 показаны различия в значениях аномалий в свободном воздухе, полученных по глобальным моделям геопотенциала на Северо-востоке России в районе Верхояно-Чукотской складчатой области, над геотектоническими структурами северо-восточной части Охотского моря и вулканическими поясами Камчатки.

При сравнении значений АСВ высокостепенных моделей ГПЗ с результатами аэрогравиметрических измерений для большинства участков трансконтинентальных перелетов установлено хорошее соответствие модельных значений измеренным. Однако в некоторых районах России все рассматриваемые модели имеют существенную систематическую погрешность (рис. 3), которая может достигать  $\sim 10$  мГал. В ряде случаев эти погрешности можно рассматривать как составляющие спектра с амплитудой до 10 мГал и длиной волны от 800 до 1300 км.

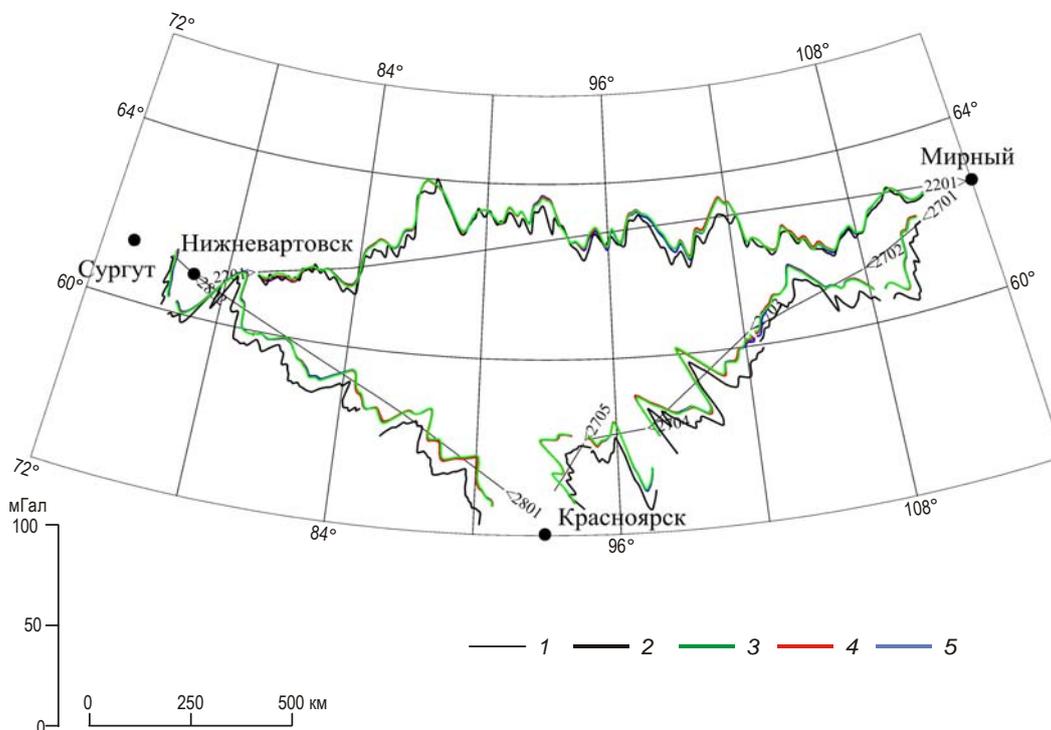
Выполненные сопоставления показали хорошее совпадение по форме измеренных и модельных АСВ. В областях, где галсы перелетов на восток и в обратном направлении пролегли довольно близко, наблюдается качественное совпадение измеренных аномалий в обоих направлениях, в том числе и на ряде участков трансконтинентальных перелетов, расположенных на значительном удалении от базовых станций. Достаточно четко выделяется аномалия силы тяжести над Уралом (длина базовой линии  $\sim 5200$  км).

При длине базовой линии 4000–4500 км стабильность функционирования системы *GPS* в дифференциальном режиме снижается из-за уменьшения числа спутников, которые одновременно “видят” самолетный приемник и базовые станции, однако и в этом случае результаты могут оставаться приемлемыми. На перелетах от Камчатки до Нижневартовска наблюдается совпадение формы аномалий силы тяжести, вычисленных на высоте полета при дифференциальном режиме обработки, с аномалиями,



**Рис. 2.** Разница (межмодельная) между значениями аномалий силы тяжести, определенными по моделям *EGM2008*, *EIGEN-6C3*, *EIGEN-6C4*, *GECO2014*, над территорией России на маршрутах перелетов П. 3 (Мирный – Охотск) и П. 4 (Охотск – Петропавловск-Камчатский)

1 – линии галсов; 2–4 – результаты сопоставления моделей *EGM2008* и *EIGEN-6C4* (2), *EGM2008* и *GECO2014* (3), *EIGEN-6C4* и *GECO2014* (4). Остальные условные знаки см. на рис. 1



**Рис. 3.** Сопоставление значений аномалий силы тяжести для территории Сибири, полученных по результатам аэрогравиметрических измерений, с рассчитанными по трем моделям ГПЗ. Полеты П. 2 (Нижневартовск – Мирный), П. 7 (Мирный – Красноярск), П. 8 (Красноярск – Сургут)

1 – линии галсов; 2 – результаты аэрогравиметрических измерений; 3–5 – значения, рассчитанные по моделям *EGM2008* (3), *EIGEN-6C4* (4), *GECO2014* (5). Остальные условные знаки см. на рис. 1

пересчитанными на высоту полета по глобальным моделям ГПЗ. Однако на отдельных галсах между измеренными и модельными аномалиями наблюдаются расхождения, достигающие 15 мГал. На перелете Красноярск – Сургут (см. рис. 3) уровни аномалий достигают  $-8.4$  мГал.

При перелетах в направлениях на восток и на запад разность между измеренными и модельными аномалиями в среднем составила  $-0.25$  мГал (при перелете на запад эта разность была равна  $-1.75$  мГал, на восток  $+1.53$  мГал).

С увеличением длины базовой линии от 4500 до 5500 км при перелетах в обоих направлениях четко выделяются три зоны. В средней зоне над Уралом ( $58^{\circ}$ – $63^{\circ}$  в.д.) число общих видимых спутников *GPS* позволило получить приемлемые значения аномалий силы тяжести при дифференциальном режиме обработки. Они хорошо совпадают как со значениями аномалий, полученными при стандартном режиме обработки при их фильтрации в окне 300 с, так и со значениями аномалий, рассчитанными по глобальным моделям ГПЗ.

К западу от Урала ( $54^{\circ}$ – $58^{\circ}$  в.д.) на перелетах в обоих направлениях в значениях аномалий, полученных в дифференциальном режиме, присутствуют высокочастотные гармоники со значительными амплитудами, тренд которых примерно совпадает с аномалиями, вычисленными в стандартном режиме (без коррекции по базовым станциям). При этом бортовым и наземным приемниками регистрировалось пять общих спутников.

К востоку от Урала ( $63^{\circ}$ – $74^{\circ}$  в.д.) при перелете в направлении на восток число общих спутников также уменьшалось до пяти (при построении навигационного решения в дифференциальном режиме *GPS*). Однако при таких длинах базовых линий число общих спутников, пригодных для построения скоростных дифференциальных фазовых решений, снижалось до 2–4, что противоречило критериям программного контроля корректности получаемых результатов и приводило к автоматической отбраковке определений координат, высоты и аномалий.

Анализ эффективного действия дифференциального режима в зависимости от расстояния до базовых станций показал, что базовые станции вносят положительный эффект для определенного повышения точности позиционирования, по крайней мере, до 4 тыс. км (при соответствующей точности измерений). При перелетах на восток и обратно отмечено, что с приближением к Сыктывкару значительно возрастает вклад помеховой составляющей и не обеспечивается коррекция координат самолета-лаборатории в дифференциальном режиме.

В дальнейшем авторы планируют продолжение исследований на трансконтинентальных перелетах, в частности, для оценки возможности повышения точности позиционирования подвижного приемника с учетом дополнительной навигационной информации, доступной из внешних источников.

### Заключение

1. Предложен метод экспериментального контроля значений аномалий силы тяжести, вычисленных по современным моделям гравитационного поля Земли высоких степеней.

2. Разница (межмодельная) между значениями аномалий силы тяжести, определенными по моделям *EGM2008*, *EIGEN-6C3*, *EIGEN-6C4*, *GECO2014*, над территорией России практически не превышает 5 мГал.

3. Показано, что величина систематической погрешности современных моделей гравитационного поля Земли относительно результатов аэрогравиметрических измерений может составлять до 10 мГал даже для средних широт. В ряде случаев эти

погрешности можно рассматривать как составляющие спектра с амплитудой до 10 мГал и длиной волны от 800 до 1300 км.

4. Анализ дальности действия базовых станций для обеспечения дифференциального режима показал, что положительный эффект их применения может наблюдаться при длине базовых линий до 4 тыс. км.

5. Для оценки погрешностей современных моделей гравитационного поля Земли на основе анализа разницы между значениями аномалий силы тяжести, полученными при аэрогравиметрических измерениях, и модельными предлагается использовать на территории России трансконтинентальные профили на разных широтах.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Камчатского филиала Геофизической службы РАН и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН за помощь в проведении экспедиционных работ и дружескую поддержку.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН “Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации” (проект “Аэрогравиметрическая съемка в высоких широтах Арктики”).

### Литература

- Абрамов Д.В., Конешов В.Н.* О характеристиках и потенциальных возможностях чувствительного элемента гравиметра GT-2A // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 2. С.39–44.
- Бержицкий В.Н., Ильин В.Н., Савельев Е.Б., Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш., Болотин Ю.В., Голован А.А., Парусников Н.А., Попов Г.В., Чичинадзе М.В.* Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1 (GT-1A). Опыт разработки и результаты летных испытаний // Гироскопия и навигация. 2002. № 3 (38). С.104–116.
- Гравиметр GT-1A (GT-2A). Краткое учебное пособие. М.: ЗАО “Научно-техническое предприятие “Гравиметрические технологии”, 2011. 120 с.
- Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Конешов И.В., Соловьев В.Н.* Создание самолёта-лаборатории и методика выполнения аэрогравиметрической съёмки в арктических условиях // Вестник Пермского университета. Сер. Геология. 2011. № 3. С.37–50.
- Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Клевцов И.В., Соловьев В.Н., Лаврентьева Е.Ю.* Создание самолёта-лаборатории и методики работ для выполнения аэрогравиметрической съёмки в арктических условиях // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44, № 3. С.5–19.
- Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Погорелов В.В., Рожков Ю.Е., Соловьев В.Н.* Особенности проведения высокоточной аэрогравиметрической съёмки в приполярных районах // Физика Земли. 2009. № 8. С.36–41.
- Клюйков А.А.* Определение параметров модели гравитационного поля Земли по измерениям в канале “спутник–спутник”, вариант “высокий–низкий” // Альманах современной метрологии ФГУП “ВНИИФТРИ”. 2015. № 3. С.117–125.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Соловьев В.Н.* Сравнение глобальных моделей аномалий гравитационного поля Земли с аэрогравиметрическими измерениями при трансконтинентальном перелете // Гироскопия и навигация. 2014. № 2(85). С.86–94.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Столяров И.А.* К вопросу исследования аномального гравитационного поля в Арктике по данным современных моделей геопотенциала // Физика Земли. 2012а. № 7/8. С.35–41.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Столяров И.А.* Об использовании современных моделей геопотенциала для исследования уклонений отвесных линий в Арктике // Гироскопия и навигация. 2012б. № 2. С.44–55.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Сермягин Р.А., Лидовская Е.А.* Об оценке точности глобальных моделей гравитационного поля Земли // Физика Земли. 2014а. № 1. С.129–138.

- Конешов В.Н., Абрамов Д.В., Дробышев Н.В., Кузнецова Н.В., Макушин А.В., Погорелов В.В., Соловьёв В.Н. Изучение гравитационного поля Земли в ходе экспедиционных работ ИФЗ РАН на Камчатке в 2014 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014б. № 2(24). С.204–210.
- Косенко В.Е. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга // Альманах современной метрологии ФГУП “ВНИИФТРИ”. 2015. № 3. С.9–20.
- Могилевский В.Е., Павлов С.А. Сопоставление моделей гравитационного поля, построенных по аэрогравиметрическим и альтиметрическим данным // Официальный сайт НПП “Аэрогеофизика”. Электронная публикация. 2009а. [http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=75%3A2009-10-15-13-32-37&catid=18%3A2009-06-23-04-49-37&Itemid=21&lang=ru](http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=75%3A2009-10-15-13-32-37&catid=18%3A2009-06-23-04-49-37&Itemid=21&lang=ru)
- Могилевский В.Е., Павлов С.А. Высокоточная аэрогравиметрическая съемка на шельфе // Официальный сайт НПП “Аэрогеофизика”. Электронная публикация. 2009б. [http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=76%3A2009-10-15-13-37-44&catid=18%3A2009-06-23-04-49-37&Itemid=21&lang=ru](http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=76%3A2009-10-15-13-37-44&catid=18%3A2009-06-23-04-49-37&Itemid=21&lang=ru).
- Могилевский В.Е., Каплун Д.В., Павлов С.А. Методика и результаты аэрогравиметрической съемки в пределах влияния зоны новых центров нефтегазодобычи // Современные аэрогеофизические методы и технологии: Сборник научных статей / Под ред. П.С. Бабаянц, В.А. Буш. М.: ЗАО “ГНПП “Аэрогеофизика”, 2009. № 1. С.15–48.
- Могилевский В.Е., Каплун Д.В., Павлов С.А., Камков А.Н. Внедрение аэрогравиметрии в практику геофизических работ // Разведка и охрана недр. 2006. № 5. С.32–35.
- Нейман Ю.М., Сугаипова Л.С. О гармоническом анализе геопотенциала по результатам проекта GOCE // Альманах современной метрологии ФГУП “ВНИИФТРИ”. 2015. № 3. С.126–131.
- Непоклонов В.Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2009. № 2 (33). С.72–76.
- Погорелов В.В., Соловьёв В.Н., Конешов В.Н. Экспериментальное исследование допустимого удаления самолета-лаборатории от базовой станции при аэрогравиметрической съемке // Материалы III Школы-семинара “Гординские чтения”, Москва, 21–23 апреля 2015 г. М.: ИФЗ РАН, 2015. С.121–125.
- Balmino G., Perosanz F., Rummel R., Sneeuw N., Siinkel H. CHAMP, GRACE and GOCE: mission concepts and simulations // Bolletino di Geofisica Teoria ed Applicata. 1999. V. 40. P.555–563.
- Barthelmes F., Förste C. The ICGEM-format // GFZ Potsdam, Department 1 “Geodesy and Remote Sensing”, 7 June 2011.
- Bouman J., Fuchs M.J. GOCE gravity gradients versus global gravity field models // Geophys. J. Int. 2012. V. 189 (2). P.846–850. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05428.x.
- Featherstone W.E. Satellite and airborne gravimetry – their role in geoid determination and some suggestions // Airborne Gravity / Ed. R. Lane. Australia: Geoscience Australia, 2010. P.58–70.
- Forsberg R., Olesen A.V., Yildiz H., Tscherning C.C. Polar Gravity Fields from GOCE and Airborne Gravity // Proc. of 4th International GOCE User Workshop. 2011. ESA SP–696.
- Förste Ch., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.M., Schaller T., Götze H.J., Ebbing J., Marty J.C., Flechtner F., Balmino G., Biancale R. EIGEN – 6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse // 5th GOCE User Workshop. 2014. Paris. 25–28 November.
- Fraser D., Fuller B., Ward S. Some numerical techniques for application in mining exploration // Geophysics. 1966. V. 31. P.1066–1077.
- Gilardoni M., Reguzzoni M., Sampietro D., Sans F. Combining EGM2008 with GOCE gravity models // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2013. V. 54, N 4. P.285–302.
- GOCE-EGM2008 combined spherical harmonic coefficients (GECO2014 model) [http://gocedata.com.polimi.it/FGECO2014\\_v2.gfc.gz](http://gocedata.com.polimi.it/FGECO2014_v2.gfc.gz).
- Hirt C., Rexer M., Scheinert M., Pail R., Claessens S., Holmes S. A new degree – 2190 (10 km resolution) gravity field model for Antarctica developed from GRACE, GOCE and Bedmap2 data // J. Geodesy. 2016. V. 10. P.105–127. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/s00190-015-0857-6.

*Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B04406. doi: 10.1029/2011JB008916

*Сведения об авторах*

**КОНЕШОВ Вячеслав Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией гравиинерциальных измерений, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

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

**ПОГОРЕЛОВ Виталий Викторович** – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь ИФЗ РАН, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 766-26-55. E-mail: vvp@ifz.ru

**НЕПОКЛОНОВ Виктор Борисович** – доктор технических наук, проректор по научной работе Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК); главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: vbner@miigaik.ru

**АФАНАСЬЕВА Лариса Витальевна** – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35.

**ДРОБЫШЕВ Михаил Николаевич** – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35.

## AIRBORNE GRAVITY SURVEY FOR ESTIMATION OF REGIONAL UNCERTAINTIES IN GRAVITY ANOMALIES DERIVED FROM MODERN EARTH GRAVITATIONAL MODELS

V.N. Koneshov<sup>1</sup>, V.N. Solovyev<sup>1</sup>, V.V. Pogorelov<sup>1</sup>, V.B. Nepoklonov<sup>1, 2</sup>,  
L.V. Afanasyeva<sup>1</sup>, M.N. Drobyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

**Abstract.** To estimate uncertainties in gravity anomalies derived from modern Earth gravitational models a series of transcontinental long distance airborne gravimetric profiles on the territory of Russia were used, that is carried out by the laboratory of graviinertial measurements of IPE RAS in 2013–2014. The measurements were made on 23 independent traces during airborne gravity survey from Syktyvkar to Petropavlovsk-Kamchatsky. As a result we estimated the conformity of modern gravitational models and their reliability in some hard-to-reach regions of Russia.

It is shown, that long distance airborne gravity survey can be used to estimate the regional uncertainties in transformants (derivatives) of anomalous gravity potential in modern Earth gravitational models.

**Keywords:** aerogravimetry, Earth gravitational model, gravity anomalies, airborne gravity survey, long distance profiles, Russia.