

◆ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ ◆

УДК 528.56

А. А. КРАСНОВ, А. В. СОКОЛОВ, Л. С. ЭЛИНСОН

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРАВИМЕТРОВ «ЧЕКАН-АМ»

Проанализирован многолетний опыт, полученный в процессе эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ» при решении различных геофизических задач. Обсуждаются особенности использования гравиметров «Чекан-АМ» на сейсмических судах и самолетах.

Введение

В 2001 г. ЦНИИ «Электроприбор» был разработан мобильный гравиметр «Чекан-АМ» [1]. Круг задач, решаемых с использованием гравиметров «Чекан-АМ», включает проведение морских гравиметрических съемок в интересах детального изучения гравитационного поля Земли, а также региональные аэрогравиметрические съемки в Арктике и других труднодоступных районах [2–6]. Наиболее широко гравиметры «Чекан-АМ» используются в процессе сейсморазведки на шельфе, а география их использования охватывает акватории Атлантического, Тихого, Южного, Индийского и Северного Ледовитого океанов от берегов Антарктиды до Крайнего Севера.

Начиная с 2002 г., когда были проведены первые морские испытания гравиметра «Чекан-АМ», было изготовлено и внедрено в эксплуатацию более 40 образцов. Среди заказчиков гравиметра практически все отечественные предприятия и организации, выполняющие морские геофизические исследования. Наряду с гравиметрами L&R и GT активно используют гравиметры «Чекан-АМ» и зарубежные компании, в том числе из Норвегии, Германии, Дании, Великобритании, США, Казахстана и Китая [7–9].

Краснов Антон Алексеевич. Начальник сектора ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург.

Соколов Александр Вячеславович. Кандидат технических наук, заместитель генерального директора по инновациям ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Элинсон Леон Соломонович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Статья по докладу на Симпозиуме международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях», 2013 г.

Особенности использования гравиметров «Чекан-АМ» при выполнении морских сейсмических работ

Особенностью использования гравиметров при выполнении морских сейсмических работ является попутный характер гравиметрических измерений. Причем в последние годы с развитием сейсмического оборудования геофизические работы выполняются и при сильном волнении моря, что существенно увеличивает фон вертикальных возмущающих ускорений и требует дополнительных алгоритмических методов компенсации влияния инерциальных ускорений [10,11].

Съемки проводятся на судах разного типа, на большинстве из которых отсутствуют специализированные гравиметрические лаборатории. Во многих случаях гравиметры размещаются в местах, мало приспособленных для их установки и в значительном удалении от центра масс судна. Тем не менее, многолетний опыт показал, что гравиметры «Чекан-АМ» обеспечивают выполнение измерений с заданной точностью на различных судах при размещении практически в любом месте, исключая установку на открытой палубе.

В большинстве случаев гравиметры неоднократно переставляются с одного судна на другое. Это обусловлено районом проведения работ. Как правило, в летний период работы выполняются в северных широтах: Северном и Баренцевом морях, море Баффина у берегов Гренландии. В зимний период съемки проводятся в основном в южных широтах: в Мексиканском заливе, Средиземном море, Гвинейском заливе, Южнокитайском море у берегов Индонезии. Таким образом, расстояния между местом проведения работ в летний и зимний период составляют тысячи миль, и транспортировка гравиметров осуществляется на самолетах. Несмотря на то, что при доставке к самолетам и в процессе погрузки аппарата подвергается значительным возмущающим воздействиям, отказов аппаратуры после установки на новый объект, как правило, не было.

География использования гравиметров «Чекан-АМ» охватывает практически полный диапазон изменения силы тяжести. Опыт эксплуатации показал, что в течение заданного срока службы 10 лет гравиметры «Чекан-АМ» обеспечивают возможность проведения измерений во всем диапазоне без какой-либо перестройки гравиметрического датчика. Значение СКО погрешности съемки обычно варьируется от 0,2 до 0,8 мГал, что связано прежде всего со степенью волнения моря, при этом пространственное разрешение съемки обычно составляет от 300 до 1500 м (половина длины волны).

Следует отметить также, что гравиметры используются крайне неравномерно. Перерыв в работе может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет. Это обстоятельство негативно сказывается на точности определения поправки за смещение нуля-пункта гравиметра. Для гравиметров «Чекан-АМ» начальное значение поправки за дрейф нуля-пункта может достигать 3 мГал/сут и, как правило, уменьшается с течением времени в 2-3 раза. Традиционно эта поправка вычисляется по результатам повторных измерений на одном и том же опорном гравиметрическом пункте (ОГП) при непрерывном термостатировании гравиметра в течение всего интервала времени между заходами судна в порт. Когда это условие выполняется (рис. 1), смещение нуля-пункта происходит по линейному закону и поправка за смещение определяется с высокой точностью.

Однако морские геофизические работы часто выполняются без заключительных опорных измерений, а начальные опорные измерения имеют недостаточную продолжительность для достоверной оценки дрейфа нуля-пункта гра-

виметра. Тогда поправка за скорость смещения нуль-пункта вычисляется по разности результатов измерений силы тяжести в точках пересечения профилей. Причем при выполнении 3Д съемки, где схему профилей образуют непересекающиеся галсы, используются дополнительные измерения, полученные при переходе с галса на галс.

Анализ морских гравиметрических съемок показал, что при наличии значительного количества пересечений на большом временном интервале этот способ является предпочтительным и обеспечивает высокую точность определения поправки к дрейфу нуль-пункта (рис. 2). Так, при наличии более 100 пересечений на временном интервале от двух недель, СКО определения этой поправки обычно не превышает 0,02-0,03 мГал/сут.

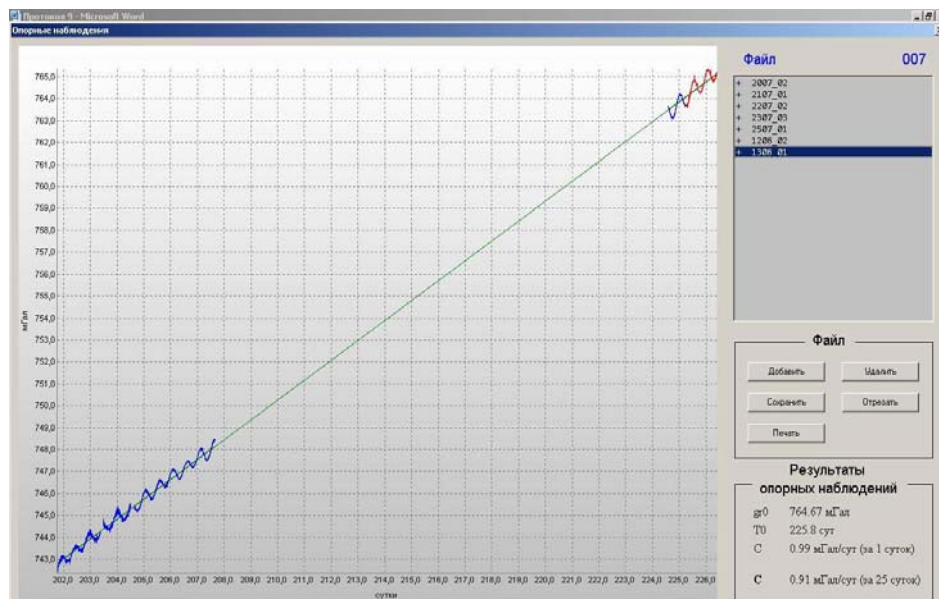


Рис. 1. Расчет поправки к скорости смещения нуль-пункта гравиметра, выполненный по результатам начальных и заключительных опорных измерений на одном ОГП

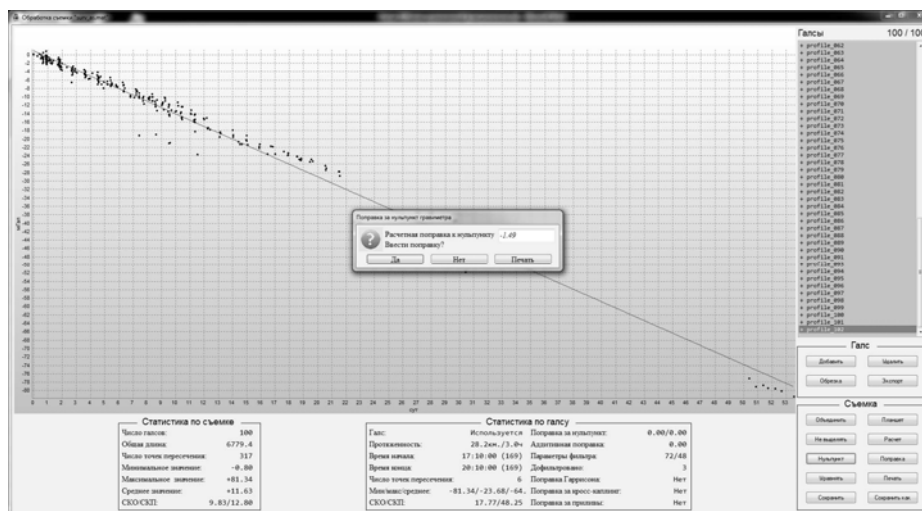


Рис. 2. Расчет поправки к скорости смещения нуль-пункта гравиметра, выполненный по данным гравиметрической съемки

В течение 10 лет для проведения морских гравиметрических съемок использовалось более 20 различных судов. За это время выполнено более 100 съемок. Длительность выполнения съемки в зависимости от поставленной задачи различалась для разных районов работ от одной недели до полугода. Соответственно протяженность пройденных линий составляла от нескольких сот до 30 тыс. км. Общий объем съемки превысил 1,5 млн. км, а число отснятых гравиметрических пунктов – более 5 млн. Средняя квадратическая погрешность измерений аномалий силы тяжести в большинстве случаев до уравнивания не превышала 1 мГал, а после уравнивания 0,2-0,3 мГал, что позволяет строить карты изоаномал с сечением 0,5-1 мГал.

Особенности аэрогравиметрических измерений

Выполнение гравиметрических съемок с борта самолетов в настоящее время становится наиболее перспективным и активно развивающимся методом исследования поля силы тяжести в труднодоступных районах Земли, и особенно Арктики [12].

В 2007–2011 гг. норвежская геофизическая компания TGS-NOPEC с использованием гравиметра «Чекан-АМ» выполнила пять региональных съемок в северной, северо-восточной и юго-западной частях шельфа острова Гренландия. В 2010 – 2012 гг. Датским техническим университетом был выполнен ряд аэрогравиметрических съемок в труднодоступных районах Земли, в том числе в Непале и Танзании.

В табл. 1 приведены технические характеристики и параметры движения самолетов, использовавшихся при выполнении авиационных геофизических работ с использованием гравиметров «Чекан-АМ».

Таблица 1

Технические характеристики самолетов

Название съемки	Тип самолета	Площадь крыла, м ²	Масса пустого самолета, т	Средняя скорость, м/с	Высота, м
ВНИИ-2007	ИЛ-18Д	140	33	100	1000
ИФЗ-09	АН-30	75	16	100	2400-3000
ULA08	Piper Navajo LN-NPZ	20	2	70	350-450
ULA09	Beechcraft King Air 90	30	4	80	320-350
SEGA11	Beechcraft King Air 90	30	4	80	400

Из представленных данных видно, что гравиметрические работы выполняются как с борта специальных научно-исследовательских самолетов (АН-30), так и с бортов легких турбовинтовых самолетов различных типов.

При проведении комплексных аэрогеофизических (магнитометрических и гравиметрических) работ приоритет отдается выполнению магнитометрических измерений. При этом для повышения их точности полеты должны выполняться с огибанием форм рельефа. А аэрогравиметрические измерения должны выполняться при полете на постоянной барометрической высоте, чтобы минимизировать возмущающие ускорения, действующие на чувствительный элемент гравиметра. Такое противоречие приводит к существенному снижению качества гравиметрических данных на галсе при изменении высоты полета, которое в

свою очередь часто имеет место при работах на шельфе в момент перехода границы «суша – море».

В связи с этим важной задачей становится оперативная обработка записанных в полете данных в целях качественного определения их пригодности для дальнейшей камеральной обработки. При этом оцениванию подвергаются около 20 параметров, среди которых уровень погрешностей стабилизации на галсе, качество удержания самолета на заданной высоте, степень турбулентности [13]. Для каждого оцениваемого параметра выработаны критерии, поэтому результаты оперативного контроля данных представляются оператору в виде «пригоден/не пригоден» (рис. 3).

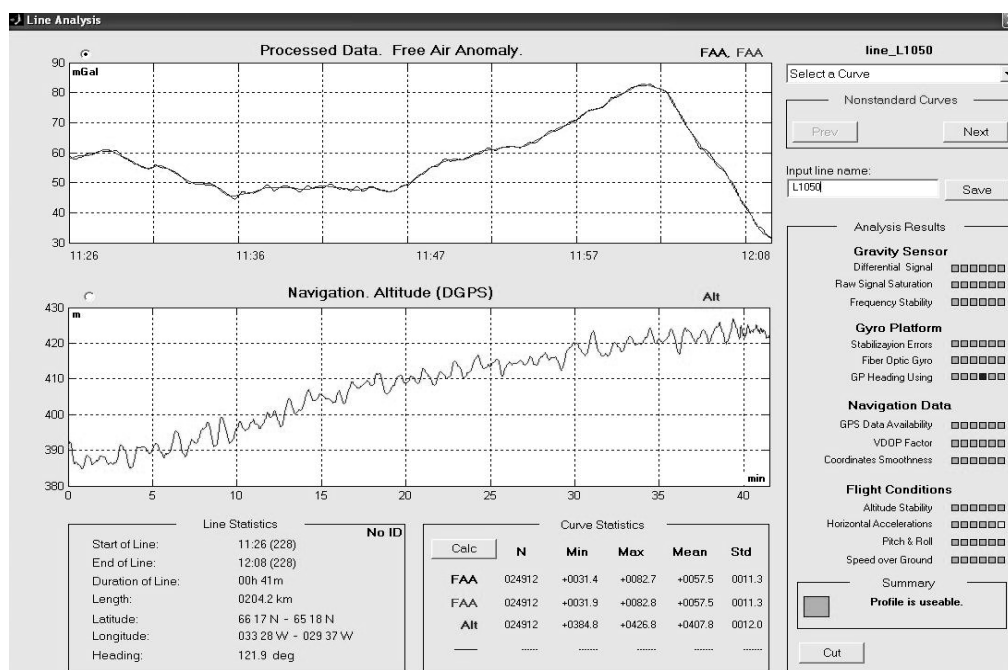


Рис. 3. Результаты полевого контроля аэрогравиметрических измерений

Этап камеральной обработки гравиметрических данных производится после компенсации остаточных погрешностей спутниковой навигационной информации. Поскольку съемки производились без использования базовых станций, повышение точности навигационного обеспечения достигалось за счет устранения погрешностей, связанных с неточностью эфемеридных данных спутников, а также компенсации ионосферных погрешностей. Решение этих задач производилось с использованием программного обеспечения поставщика спутниковой приемной аппаратуры. Погрешность определения высоты на съемочных профилях по результатам постобработки составляла менее 5 см для 90% данных.

Продолжительность полевых аэрогравиметрических работ составляла 1-2 месяца. В течение этого времени поддерживалось непрерывное термостатирование гравиметрической аппаратуры. Поскольку изменения температуры воздуха в период выполнения съемки достигали 30°C, важной задачей являлось поддержание постоянной температуры в месте установки гравиметра в салоне самолета.

Скорость самолетов на съемочных профилях шельфа Гренландии составляла около 70 м/с. В камеральной обработке применялся оконный фильтр с частотой

среза 0,01 Гц. Таким образом, разрешающая способность результатов измерений на съемочных профилях составляла около 7 км (половина длины волны). Съемки выполнялись по сети галсов основного и контрольного покрытий. При этом межгалсовое расстояние было задано исходя из необходимого масштаба итоговой карты аномалий силы тяжести (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Оценки погрешностей аэрогравиметрических съемок

Съемка	Межгалсовое расстояние, км	Общая протяженность галсов, км	Число контрольных пунктов	Разрешение, км	СКО съемки, мГал
NEGAG07	4 / 20	34319	1115	~7	0,87
NEGAG08	4 / 40	49776	1079	~7	0,77
ULAG08	4 / 40	50684	1082	~7	0,70
ULAG09	8 / 40	39897	2120	~7	0,70
SEGA11	6 / 30	24231	578	~7	0,85

Камеральная обработка результатов съемок, выполненная с использованием специально разработанного программного обеспечения, подтверждает высокое качество полученных данных. Общая протяженность галсов гравиметрических съемок превысила 300 тыс.км. Среднеквадратическое отклонение погрешности данных по внутренней сходимости результатов измерений на галсах не превышает 1 мГал при пространственном разрешении около 7 км.

Работы выполнены в суровых погодных условиях Арктики, Африки и Гималаев. При этом две съемки проводились в районах свыше 75° с. ш. При проведении съемок не зарегистрировано ни одного отказа гравиметрической аппаратуры, а общее количество отбракованных по различным причинам данных составило менее 4%.

З а к л ю ч е н и е

Большой опыт, полученный в процессе многолетней эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ», позволил более полно учесть специфику его современного использования при выполнении морских и аэрогравиметрических работ и сформировать направления дальнейшего совершенствования аппаратуры. Вследствие этого при разработке в 2012 г. нового аэроморского гравиметра серии «Чекан» был внедрен ряд технических решений, позволивший улучшить как точностные, так и эксплуатационные характеристики гравиметра [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Krasnov, A.A., Nsenyuk, L.P., Peshekhonov, V.G., Sokolov, A.V., Elinson, L.S.** Integrated Marine Gravimetric System. Development and Operation Results // Gyroscopy and Navigation. - 2011. - Т. 2. № 2. - С. 75-81.
2. **Краснов, А.А., Соколов, А.В.** Изучение гравитационного поля труднодоступных районов Земли с использованием мобильного гравиметра "Чекан-АМ" // Труды Института прикладной астрономии РАН. - 2009. = № 20. - С. 353-357.
3. **Дробышев, Н.В., Конешов, В.Н., Конешов, И.В., Соловьев, В.Н.** Создание самолета-лаборатории и методика выполнения аэрогравиметрической съемки в арктических условиях // Вестник Пермского университета. - 2011. - №3. - С.37-50.

4. Атаков, А.И., Локшин, Б.С., Прудников, А.Н., Шкатов, М.Ю. Результаты комплексной геофизической съемки на Ушаковско-новоземельской площади Карского моря // Труды международного симпозиума: Наземная, морская и аэрогравиметрия. - 2010. - С. 33-35.
5. Лыгин, В.А. Измерения силы тяжести в транзитных зонах с использованием судна на воздушной подушке // Труды международного симпозиума: Наземная, морская и аэрогравиметрия. - 2010. - С. 47-49.
6. Железняк, Л.К. Точность измерений гравиметрическим комплексом «Чекан-АМ» в море // Физика Земли. - 2010. - № 11. - С. 95-98.
7. Forsberg, R., Olesen A., Einarsson, I. Airborne Gravimetry for Geoid Determination with Lacoste Romberg and Chekan-AM Gravimeters. Proceedings of IAG International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. – Saint -Petersburg, Russia. – 2013.
8. Barthelme, S. F., Petrovic, S., Pflug, H. First Experiences with the GFZ New Mobile Gravimeter Chekan-AM. Proceedings of IAG International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. – Saint -Petersburg, Russia. – 2013.
9. Kovrizhnykh, P.N., Shagirov, B.B., Yurist, S.Sh., Bolotin, Yu.V. Marine Gravity Survey at the Caspian with GT-2M, Chekan AM and L&R Gravimeters: Comparison of Accuracy.
10. Железняк, Л.К., Краснов, А.А., Соколов, А.В. Влияние инерционных ускорений на точность гравиметра "Чекан-АМ" // Физика Земли // 2010. - № 7. - С. 29-32.
11. Elinson, L.S., Krasnov, A.A., Smirnova, L.A., Sokolov, A.V., Zheleznyak, L.K. Methods for Decreasing Errors of Marine Gravity Survey Fulfilled at Rough Sea. Proceedings of IAG International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. – Saint -Petersburg, Russia. – 2010.- Pp.50-54.
12. Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., Usov, S.V. Modern Equipment and Methods for Gravity Investigation in Hard-to-Reach Regions // Gyroscopy and Navigation. - 2011. Т. 2. - № 3. - С. 178-183.
13. Sokolov, A.V. High Accuracy Airborne Gravity Measurements. Methods and Equipment. В сборнике: IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) Сер. "Proceedings of the 18th IFAC World Congress". - 2011. - С. 1889-1891.
14. Краснов, А.А., Соколов, А.В., Элинсон, Л.С. Новый аэроморской гравиметр серии «Чекан». Гироскопия и навигация. -2014. - № 1. – С.

Abstract. The paper analyzes the long-term operational experience with the Chekan-AM gravimeter intended to solve various geophysical problems. Specific features of the Chekan-AM operation aboard seismic vessels and aircraft are considered. The factors affecting the null-point drift rate stability of the gravimeter and some procedures for its refinement are discussed. A number of additional technical requirements have been formulated, aimed at improving the accuracy of gravimetric measurements. These requirements are supposed to be implemented in a new air-sea gravimeter of the Chekan type.

Key words: Chekan-AM gravimeter, null-point, gravimetric measurements