

Р. ФОРСБЕРГ, А.В. ОЛЕСЕН, И. ЭЙНАРССОН

ПРОВЕДЕНИЕ АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ГРАВИМЕТРАМИ «ЛАКОСТА-РОМБЕРГ» И «ЧЕКАН-АМ» С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОИДА

Для авиационных измерений гравитационного поля Земли, выполняемых в рамках крупномасштабных национальных проектов при решении геодезических задач, таких как определение геоида и построение глобальных геопотенциальных моделей, требуются гравиметры с высокой стабильностью нуля, а также надежно работающие в условиях турбулентности. Датский технический университет в течение многих лет выполняет аэросъемки на больших территориях в полярных, тропических районах и регионах с умеренным климатом. В последнее время для повышения надежности и резервирования данных в некоторых исследованиях мы стали совместно применять два гравиметра («ЛаКоста-Ромберг» и «Чекан-АМ»). В статье приведены примеры результатов съемок, подтверждающие достижение точности порядка 1 мГал при летных испытаниях в Дании и порядка 3 мГал при сравнении результатов съемок гравиметрами «Чекан-АМ» и «ЛаКоста-Ромберг» в Непале, одном из самых сложных для съемки регионов Земли. Также отмечается хорошее согласование аэрогравиметрических данных и данных от спутника GOCE по территории Непала и описывается применение полученных данных для уточнения модели геоида.

Ключевые слова: гравиметр «Чекан-АМ», гравиметр «ЛаКоста-Ромберг», аэрогравиметрические измерения

Введение

С начала 1990-х гг. аэрогравиметрические измерения зарекомендовали себя как надежная технология высокоточного определения параметров гравитационного поля Земли. Развитие технологии производилось, главным образом, в коммерческой области и было мотивировано необходимостью картографирования гравитационных аномалий с высокой точностью и разрешением в интересах поиска нефти, газа и полезных ископаемых; достигнутая к настоящему времени точность составляет порядка 1 мГал [15, 3]. Использование спутниковых технологий для региональных исследований гравитационного поля было начато американскими и российскими государственными организациями, а позднее исследования были продолжены

Форсберг Рене. Профессор Национального космического института, Датский технический университет, Лингби, Дания.

Оlesen Арне. Старший научный сотрудник Национального космического института, Датский технический университет.

Эйнарссон Индриди. Национальный космический институт, Датский технический университет.

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

Научный редактор перевода начальник сектора АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» Краснов А. А.

различными научными коллективами [1, 9]. Специализированные приложения для определения геоида в прибрежных областях были разработаны в конце 1990-х гг. в рамках двух американских проектов по Северному Ледовитому океану [4], а также европейского проекта AGMASCO (Airborne Geoid Mapping System for Coastal Oceanography – Воздушная система картографирования геоида для береговой океанографии) [5]. Позднее технология и опыт работы, полученный в ходе проекта AGMASCO, были широко использованы при выполнении протяженных съемок на малых летательных аппаратах во всех частях света [11, 8, 7].

В большинстве вышеназванных проектов использовался морской гравиметр «ЛаКоста-Ромберг» с маятниковым чувствительным элементом и воздушным демпфированием, подробно описанный в [14]. В данной статье представлены результаты сравнительных испытаний гравиметра «ЛаКоста-Ромберг» и нового российского гравиметра – «Чекан-АМ» производства ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург (рис. 1). Гравиметр «Чекан-АМ» построен на основе двойной кварцевой упругой системы с жидкостным демпфированием, а угловые колебания маятников записываются с использованием ПЗС-матрицы [10]. Чувствительный элемент гравиметра «Чекан-АМ» установлен на инерциальной стабилизированной платформе, корректируемой по спутниковым данным, более современной, чем относительно простая двухосная гироскопическая платформа гравиметра «ЛаКоста-Ромберг». Поскольку в аэрогравиметрии погрешности горизонтирования являются основным источником систематической погрешности, по данному параметру гравиметр «Чекан-АМ» должен обладать большей точностью, чем гравиметр «ЛаКоста-Ромберг».



Рис. 1. Гравиметр «Чекан-АМ»

Также в статье приведено описание совместных летных испытаний двух гравиметров в Дании и Непале: в первом случае это низкодинамичный эксперимент с благоприятными условиями, а во втором случае испытания производились в высокодинамичных условиях турбулентности над одним из самых изрезанных участков гравитационного поля планеты. В испытаниях, описанных ниже, использовано оригинальное программное обеспечение для обработки данных «ЛаКоста-Ромберг» [12], а также новое программное обеспечение, разработанное Датским технологическим институтом для обработки данных гравиметра «Чекан-АМ», учитывающее известную аппаратную фильтрацию гравиметра.

Летные испытания гравиметра «Чекан-АМ» в Дании

Летные испытания гравиметра «Чекан-АМ» были проведены 21 декабря 2010 г. на самолете Beech King Air 200, принадлежащем компании COWI, Дания. Полеты были осуществлены на прямом и обратном галсах на двух

различных небольших высотах по траектории ЮВ-СЗ над территорией Дании с подробной сетью наземных гравиметрических данных из Датской национальной базы (рис. 2). Профиль пересекал две основные аномалии:

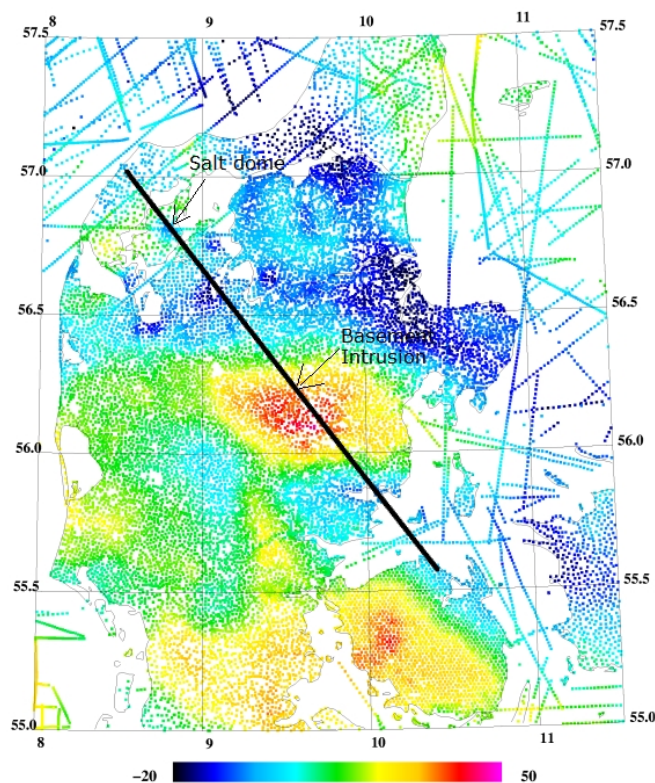


Рис. 2. Траектория испытательного полета гравиметров «ЛаКоста-Ромберг» и «Чекан-АМ» и карта гравитационных аномалий в свободном воздухе (мГал)

аномалию Силкеборг-хай – большую аномалию, возникшую вследствие предполагаемых проникновений подстилающих пород под толстые осадочные отложения, и узкую аномалию Морс-лоу, связанную с крупным неглубоким соляным куполом. Результаты, полученные на профиле, в сравнении с пересчитанными в верхнее полупространство наземными опорными данными показаны на рис. 3.

Сравнение двух полетов выявляет разницу между измеренными аномалиями в свободном воздухе и пересчитанными в верхнее полупространство наземными гравиметрическими данными на уровне $0,72 \pm 0,85$ мГал при прямом полете (на север) и $-2,16 \pm 1,45$ мГал при обратном. Это весьма удовлетворительный результат, демонстрирующий неизбежные ошибки пересчета в верхнее полупространство с использованием БПФ при отсутствии данных по некоторым морским районам. Относительно высокая скорость самолета King Air также играет роль в помехах при сравнении. Таким образом, испытания показали, что гравиметр «Чекан-АМ» в благоприятных условиях полета способен обеспечивать точность на уровне 1 мГал.

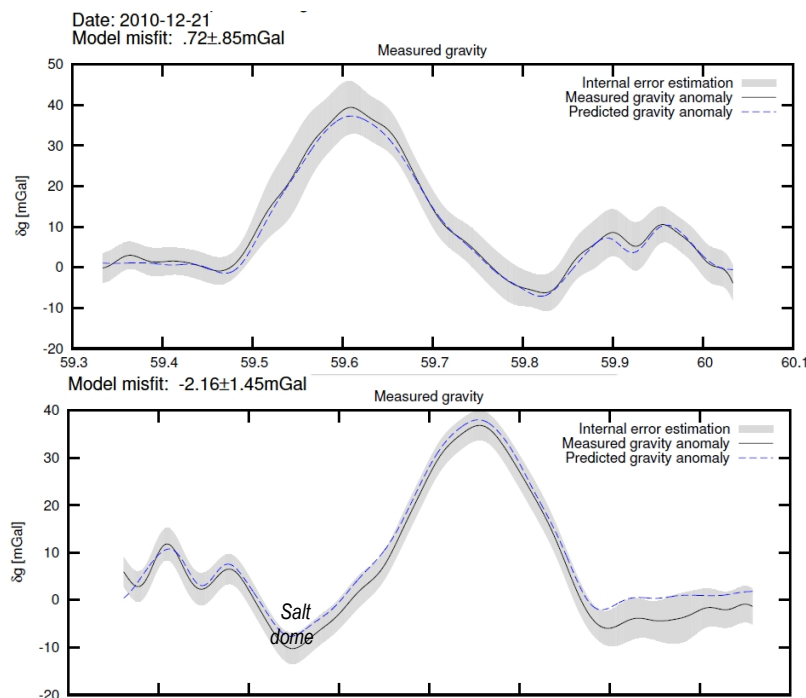


Рис. 3. Результаты полетов в направлении ЮВ-СЗ и СЗ-ЮВ в сравнении с пересчитанными в верхнее полупространство наземными гравиметрическими данными

Совместная аэросъемка гравиметрами «Чекан-АМ» и «ЛаКоста-Ромберг» в Непале

Аэрогравиметрические полеты проводились в рамках проекта национального картографирования геоида в Непале в сотрудничестве с Топографическим управлением Непала при поддержке Национального геопространственного агентства США. Съемка была проведена в период 4-17 декабря 2010 г. с помощью того же самолета, что и при испытаниях в Дании. На рис. 4 представлены гравиметры «Чекан-АМ» и «ЛаКоста-Ромберг», установленные в самолете Beech King Air компании COWI. Этот самолет, оборудованный герметизированной кабиной, прибыл в Непал из Дании, так как ни один местный самолет не подходил для выполнения таких сложных полетов над высочайшими горами Земли.



Рис. 4. Гравиметры «Чекан-АМ» (слева), «ЛаКоста-Ромберг-S34» (в центре), установленные в самолете King Air (справа)

Профили съемки над Непалом были проложены на расстоянии порядка 6 морских миль друг от друга (см. рис. 5). Из-за сильно различающихся топографических условий полеты проводились на высотах от 4 км на южных профилях до 10 км на северных, в соответствии с топографией. Полеты по секущим профилям проводились на большой высоте. По этой причине результаты измерений на секущих профилях нельзя напрямую использовать для оценки качества съемки, а требуется интегрированный процесс пересчета в верхнее/нижнее полупространство, как описано в [7]. Реактивные потоки на высоте при скорости ветра более 100 узлов приводили к значительным трудностям в работе прежде всего при полетах в северном направлении, создавая сильную турбулентность и горные волны, сильно влияющие на гравитационные измерения, при этом на некоторых частях профилей было невозможно выполнить измерения и обработку, а значит, образовывались недопустимые пробелы в данных (рис. 5).

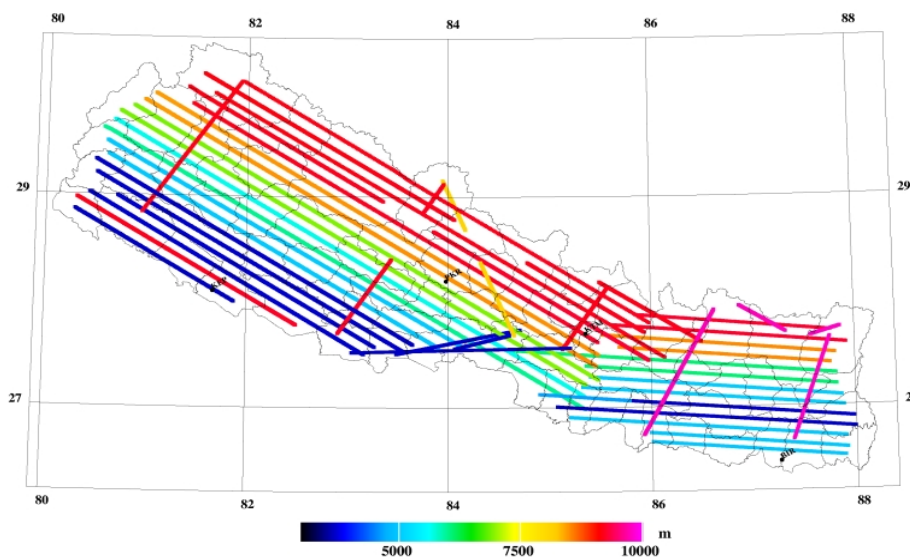


Рис. 5. Высота полета (м) при аэрогравиметрической съемке в Непале по обработанным данным гравиметра «ЛаКоста-Ромберг»

Обработанные данные «ЛаКоста-Ромберг» охватили территорию всей страны, не считая небольших пробелов (см. рис. 5), в то время как данные от «Чекан-АМ» продемонстрировали большее количество проблем, включая сбои на нескольких профилях (в частности, вследствие проблем с питанием), но особенно в случае насыщения датчика в условиях турбулентности. На рис. 6 показаны обработанные данные гравиметра «Чекан-АМ», а на рис. 7 – примеры данных по профилям для обоих гравиметров. Один из этих примеров четко демонстрирует эффект выхода измерений «Чекан-АМ» за пределы диапазона. Такие участки данных можно обнаружить по разности показаний одинарных кварцевых систем ($m_1 - m_2$) чувствительного элемента гравиметра «Чекан-АМ», в связи с чем возможно частичное восстановление данных. Тем не менее устойчивость к турбулентности для гравиметра «Чекан-АМ» ниже, чем для гравиметра «ЛаКоста-Ромберг».

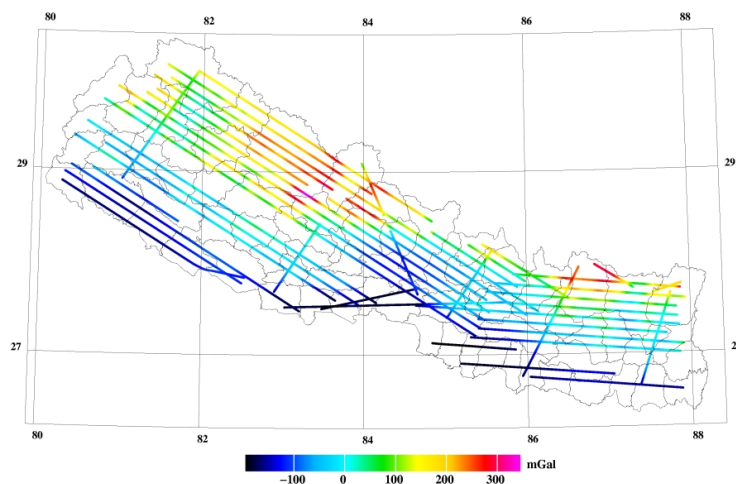


Рис. 6. Обработанные данные «Чекан-АМ» (аномалия в свободном воздухе на высоте)

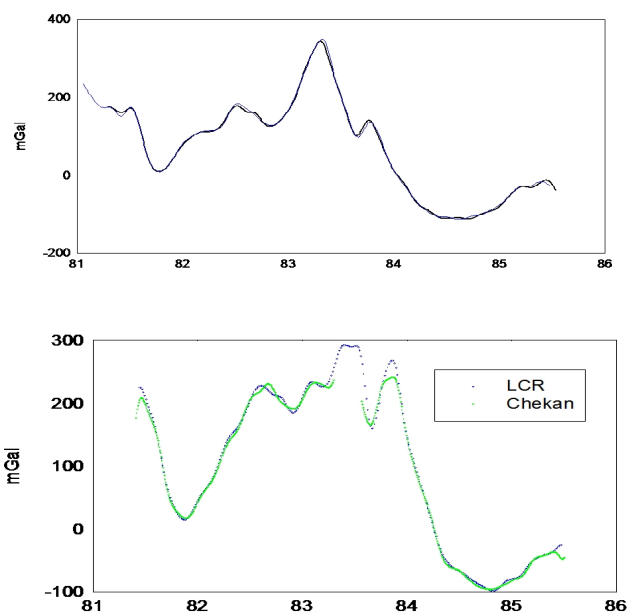


Рис. 7. Пример двух профилей (20 и 24) в высоких горах при независимой обработке данных гравиметров и аналогичных параметрах фильтрации.
На профиле 24 видны примеры насыщения гравиметра «Чекан-АМ»

Итоги сравнения двух гравиметров по совместным профилям приведены в таблице 1; фильтрация произведена с помощью прямого/обратного фильтра Баттерворта третьего порядка с номинальным пространственным разрешением данных порядка 8 км. В таблице также показаны погрешности по пересечениям для двух гравиметров после гармонического продолжения в верхнее/нижнее полупространство до высоты 6000 м. Продолжение было выполнено по методу коллокации наименьших квадратов с введением поправок на рельеф; подробное описание метода см. в [8].

Сравнение гравиметрических данных «Чекан-АМ» и «ЛаКоста-Ромберг»

	СКП (мГал)
Согласование данных гравиметров	4,5
Погрешность по пересечениям, продолжение до 6000 м, «ЛаКоста-Ромберг»	4,6
Погрешность по пересечениям, продолжение до 6000 м, «Чекан-АМ»	5,1
Погрешность по пересечениям, продолжение до 6000 м, комплект из двух гравиметров	3,9

Поскольку данные двух гравиметров имеют разное количество точек пересечения из-за отсутствия некоторых профилей в южном районе съемки с менее изрезанным гравитационным полем, разница в погрешности по пересечениям для двух гравиметров не так значительна. Погрешность по комплекту получена путем осреднения результатов двух гравиметров, что улучшает полноту покрытия площади аэросъемки. Результирующая точность аэрогравиметрических данных по комплекту составляет порядка 3 мГал, что весьма удовлетворительно, учитывая условия полета, и создает хорошие предпосылки для точного оценивания геоида.

Другой интересующий нас параметр – дрейф нуля гравиметра «Чекан-АМ» – представлен на рис. 8. Стояночные измерения в аэропорту Катманду в период съемки в Непале выявили относительно высокий дрейф нуля гравиметра. Дрейф составил около 50 мГал/месяц, что на порядок выше дрейфа нуля гравиметра «ЛаКоста-Ромберг», но за счет его линейности не сильно сказывается на качестве результатов съемки.

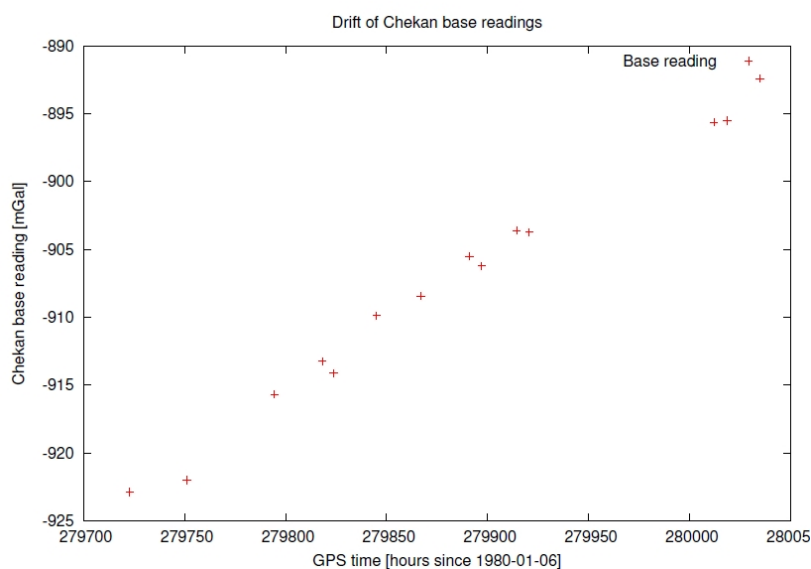


Рис. 8. Дрейф нуля гравиметра «Чекан-АМ» по стояночным измерениям в аэропорту Катманду

Уточнение модели геоида в Непале

Для уточнения модели геоида в Непале использовались полученные аэрогравиметрические данные по комплексу гравиметров наряду с новыми данными от спутника GOCE, а также существующими наземными гравиметрическими данными и данными о рельефе от SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Определение геоида путем использования метода вычитания-восстановления, сферических методов БПФ и продолжения в нижнее полупространство по методу коллокации наименьших квадратов детально описано в [8, 6]. На рис. 9 показано итоговое распределение аэро- и наземных гравиметрических данных, на рис. 10 – аэрогравиметрические данные и данные от спутника GOCE («прямая» модель, версия 4), убедительно подтверждающие правильность данных GOCE, и на рис. 11 – результирующий геоид.

Вследствие отсутствия данных GPS-нивелирования проверка точности геоида невозможна. Для Китая и Индии нет гравиметрических данных, поэтому данные геоида более неопределенны в районах, прилегающих к границам; однако высокое качество данных GOCE компенсирует эти эффекты, и результирующая точность геоида составляет порядка 10 см. Для 8 точек GPS-нивелирования в долине Катманду наблюдаемая величина среднеквадратического отклонения 7 см между геоидом по данным GPS-нивелирования и по данным выполненной съемки подтверждает такую оценку погрешности.

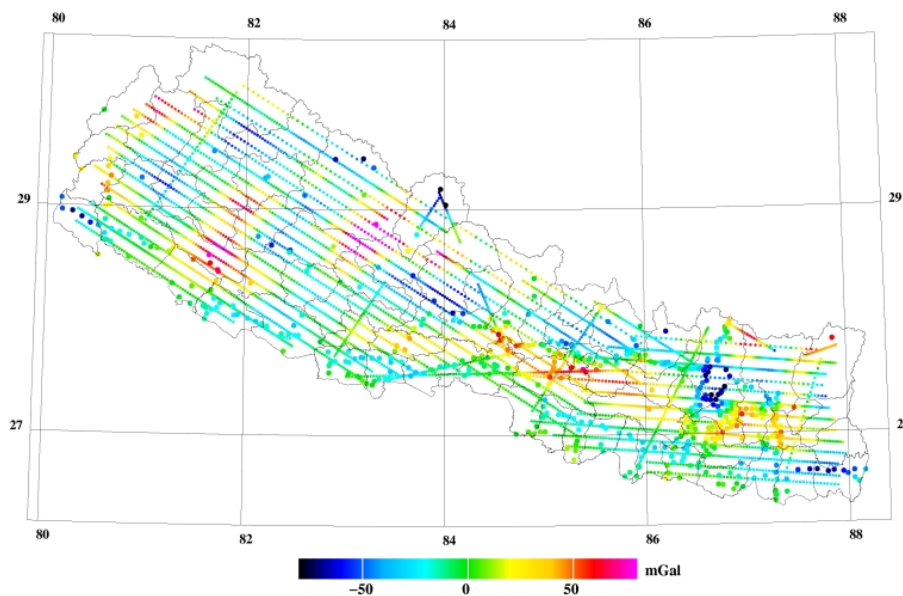


Рис. 9. Комбинированный набор аэро- и наземных гравиметрических данных по территории Непала. Аэрогравиметрические данные прорежены до 30 с для процесса определения геоида; сильные ветра на высоте, приходящие в основном с запада, означают, что полеты в направлении В-З будут иметь более плотную выборку, чем в направлении З-В, что явно видно по полетам в северной части района съемки.

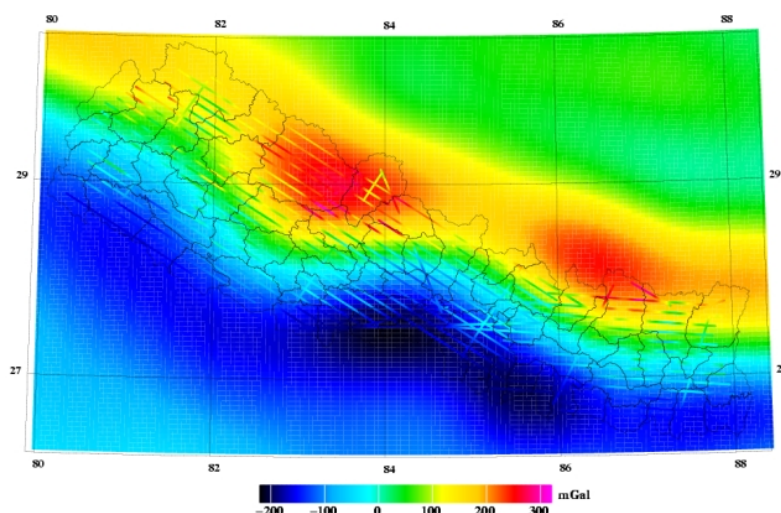


Рис. 10. Набор комбинированных аэрогравиметрических данных, наложенных на гравитационные аномалии по данным GOCE, сер. 4

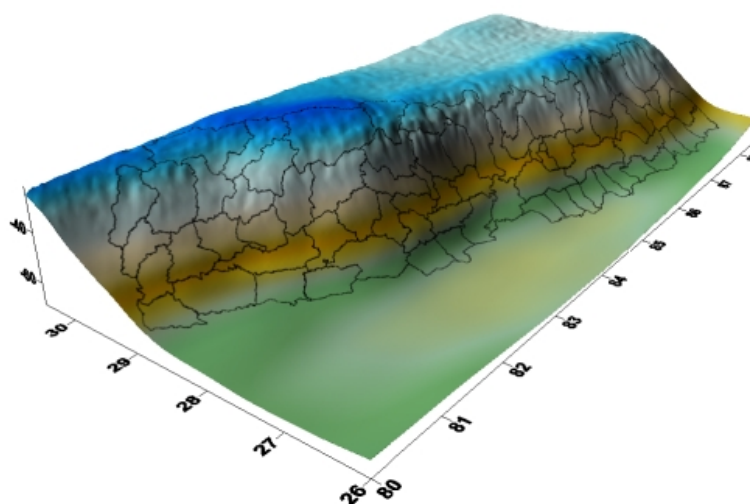


Рис. 11. Модель геоида Непала по данным аэрогравиметрии и GOCE

Выводы

В статье представлены результаты первых летных испытаний гравиметра «Чекан-АМ», приобретенного Датским техническим университетом. При испытательном полете в благоприятных условиях в Дании была продемонстрирована точность порядка 1 мГал. При крупной аэрогравиметрической съемке в Непале в сложных условиях изрезанного гравитационного поля и турбулентности получена точность порядка 3 мГал, что сопоставимо или несколько хуже, чем точность одновременно участвовавшего в полетах гравиметра «ЛаКоста-Ромберг S-34». В процессе полетов в Непале возникали трудности в связи с насыщением чувствительного элемента гравиметра «Чекан-АМ» и ошибками оператора, что привело к некоторой потере данных. В основном гравиметр выходил за пределы диапазона на короткое время в условиях сильной турбулентности или горных волн; эти участки полета могут быть идентифицированы по разности показаний

одинарных кварцевых систем чувствительного элемента гравиметра «Чекан-АМ», что дает возможность предупредить такие явления при полетах с использованием только прибора «Чекан-АМ».

Данные по комплекту гравиметров «Чекан-АМ» и «ЛаКоста-Ромберг» совместно с новыми данными от спутника GOCE и топографическими данными от миссии SRTM были использованы для получения усовершенствованной национальной модели геоида Непала. Ее точность составила порядка 10 см на большей части территории страны, что подтверждено данными GPS-нивелирования в долине Катманду.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bell R. E., Coakley B. J., Blankenship D. D., Hodge S. M., Brozena J. M., Jarvis J.** Airborne gravity from a light aircraft: CASERTZ 1990-91. Recent Progress in Antarctic Earth Science, Yoshida Y., Ed., Terrapub, Tokyo, 1992, pp. 571-577.
2. **Brozena J. M.** The Greenland Aerogeophysics Project: Airborne gravity, topographic and magnetic mapping of an entire continent, in From Mars to Greenland, Proc. IAG symposia 110, Colombo O., Ed., Springer Verlag, 1992, pp. 203-214.
3. **Elieff S., Ferguson S.** Establishing the "air truth" from 10 years of airborne gravimeter data, First Break, 2008, 26, November 2008.
4. **Forsberg R., Brozena J.** Airborne geoid measurements in the Arctic ocean, Proc. International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy, Tokyo, Sept. 1996, Springer Verlag IAG series 117, pp. 139-147.
5. **Forsberg R., Hehl K., Bastos L., Giskehaug A., Meyer U.** Development of an airborne geoid mapping system for coastal oceanography (AGMASCO), Proc. International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy, Tokyo, Sept. 1996, Springer Verlag IAG series vol 117, pp. 163-170.
6. **Forsberg R., Olesen A.** Airborne gravity field determination, in Sciences of Geodesy – I, Advances and Future Directions, Xu G., Ed., Springer Verlag, ISBN 978-3-642-11741-1, 2010, pp. 83-104.
7. **Forsberg R., Olesen A., Alshasi A., Giskehaug A., Ses S., Kadir M., Majid, Peter B.** Airborne gravimetry survey for the marine area of the United Arab Emirates, Marine Geodesy, 2012, vol. 35, no. 3, doi: 10.1080/01490419.2012.672874, pp. 221-232.
8. **Forsberg R., Olesen A. V., Einarsson I., Manandhar N., Shrestha K.** Geoid of Nepal from airborne gravity survey, Proc. IAG Symposia 139, Springer Verlag, 2011, pp. 521-528.
9. **Klingele E., Halliday M., Cocard M., Kahle H.-G.** Airborne gravimetric survey of Switzerland, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1995, no. 4, pp. 248-253.
10. **Krasnov A. A., Nesenjuk L. P., Peshekhonov V. G., Sokolov A. V., Elinson L. S.** Integrated marine gravimetric system. Development and operation results, Gyroscopy and Navigation, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 75-81.
11. **Olesen A. V., Forsberg R., Keller K., Giskehaug A.** Airborne gravity survey of the Lincoln Sea and Wandel Sea, North Greenland, Phys. Chem. Earth (A), 2000, vol. 25, no. 1, pp. 25-29.
12. **Olesen A. V.** Improved airborne scalar gravimetry for regional gravity field mapping and geoid determination, Ph.D. dissertation, National Survey and Cadastre of Denmark Technical Report 24, 2002.
13. **Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J.** An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, April, 2008.
14. **Valliant H. D.** The LaCoste and Romberg Air/Sea gravity meter: An overview, in Geophysical Exploration at Sea, vol. 1, 1991, 2nd Edition, pp. 141-176.
15. **Williams S. J. D., MacQueen D.** Development of a versatile, commercially proven, and cost-effective airborne gravity system, The Leading Edge, June 2001, pp. 651-654.

Abstract. Airborne gravimetry for geodetic purposes such as geoid determination and global geopotential models requires good bias stability, as well as good performance in turbulence for large-scale national projects. DTU-Space has since many years carried out large area airborne surveys over polar, tropical and temperate regions.

Recently we have started flying two gravimeters (L&R and Chekan-AM) side by side for increased reliability and redundancy in several surveys. In the paper we will give some examples of recent survey results, confirming accuracies in the 1 mGal range for a well-controlled Danish flight test, and around 3 mGal for intercomparisons of Chekan and L&R results in Nepal, one of the most challenging field survey regions on the Earth. We also indicate the good agreement between airborne gravity and GOCE data in Nepal, and outline the use for improved geoid determination.

Key words: airborne gravimeter, strapdown inertial navigation system; INS/GPS integration; gravity anomaly