



Страницы истории отечественного геофизического приборостроения

Зайченко В.Ю., ВНИИгеосистем, г. Москва

"Отыщи всему начало и ты многое поймешь"
К. Прутков

(Продолжение, начало см. в №01(03)2003 г.)

Во ВНИИгеофизике в эти годы были развернуты беспрецедентные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию гравиметрической аппаратуры различного назначения.

На базе теории нелинейных гравиметров и новых принципов измерения силы тяжести (К.Е. Веселов) был создан целый ряд приборов таких как ГАК-3М (К.Е. Веселов, П.И. Лукавченко), пригодный для съемок в труднодоступных местностях; ГАК-4М, ГАК-Н, Дельта, ГНУК-1, ГНУК-В с улучшенными характеристиками (К.Е. Веселов, Л.В. Калишева, Ю.С. Евдокимов, Р.А. Юдина, Н.М. Геренблат, Л.А. Петров, С.И. Хитров и др.). Эти типы гравиметров были поставлены на серийное производство на заводах "Нефтекип" и "Геологоразведка", объемы их выпуска обеспечивали всевозрастающее производство гравиметрических исследований на все виды полезных ископаемых и применение высокоточной гравиметрии для решения инженерно-геологических задач (Таблица 1).

Начатые в 1930 году систематические определения силы тяжести на море по инициативе и при участии Л.В. Сорокина (МГУ) показали возможность использования этих данных для выявления нефтегазоперспективных структур и, прежде всего, в шельфовой зоне. Проведенные им исследования на Апшеронском полуострове в Азербайджане привели к необходимости прослеживания в шельфовой зоне Каспийского моря выявленных в пределах суши

нефтяных месторождений. Это потребовало создания специальной аппаратуры для измерения силы тяжести на дне водоемов.

Во ВНИИгеофизике в 50-х годах были впервые разработаны донные астазированные металлические гравиметры ДГПЕ (Г.Ч. Рудаковская, А.М. Лозинская, П.И. Лукавченко, К.Е. Веселов), которые начали широко применяться в производственных условиях.

Положительные результаты, полученные при поисках нефтегазоперспективных структур в прибрежной части Каспийского моря, укрепили позиции донной гравиметрии, которая заняла достойное место в общем комплексе поисковых геофизических работ.

Позже на базе кварцевых астазированных гравиметров во ВНИИгеофизике были разработаны и усовершенствованы донные гравиметры марки ГДКА с фотоэлектрической индикацией и электромеханической и электростатической компенсацией, а затем КДГ-II и КДГ-III, в которых приращение силы тяжести измерялось способом возвратного потенциала.

В 1962 - 1964 гг. был создан донный кварцевый гравиметр с электромеханическим телеуправлением ГДК-ЭМТ. (П.И. Лукавченко, В. Демченко, М.А. Белкин, К.Е. Веселов, О.И. Науменко-Бондаренко). Несколько раньше был разработан телевизионный металлический донный гравиметр (Г.М. Минензон, М.С. Давыдов, Ю.К. Рябиков), но он широкого распространения не получил [1]. В дальнейшем донные гравиметры подвергались только автоматизации, а их конструкция существенным изменениям не подвергалась.

В этой работе активное участие принимали А.А. Аликберли, К.Е. Веселов, Л.Д. Немцов, В.Ф. Попов и Л.А. Губенко.

Донные гравиметры в различных модификациях выпускались на заводе "Нефтекип" и по

Таблица 1 Выпуск гравиметров различных типов на заводах отечественного приборостроения (штук)

Наименование заводов и типов продукции	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Завод "Нефтекип" гравиметры:															
ГНУ-К2	140	0	155	130	140	130	135	120	130	125	120				
ГНУ-К1	16	0	25	30	30	20	25	25	20	20	25	30	25	-	20
ГНШ-К2	15	0	-	18	-	-	12	-	-	14	-	-	-	-	-
ГДК-Г	5	5	5	5	6	4	5	5	4	4	4	5	6	6	7
ГМН-72	2	4	3	4	5	5	4	5	5	2	-	-	-	-	-
ГМН-К											4	5	5	8	10
ГНУ-КС						-	13	30	10	10	15	20	30	90	150
ГНУ-КВ						50	50	50	71	50	40	50	80	100	45
Завод "Геологоразведка" гравиметры:															
"Дельта - 2"	100	100	100	-	50	50	30	30	30	30	40	40	30	40	-
ГНШ-К2	-	-	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	-

своим характеристикам удовлетворяли требованиям производства (таблица 1).

Измерения силы тяжести, выполненные в 30-х годах Л.В. Сорокиным, а также его учеником профессором В.В. Федынским, на движущихся судах нефтеналивных танкерах в Каспийском море (1933 г.), курсирующих между Баку и Махачкалой, Астраханью и Красноводском, выделилось в самостоятельное направление - изучение гравитационного поля Мирового океана и акваторий морей, сыгравшее определяющую роль в геологическом изучении литосферы, для расчетов траекторий искусственных спутников Земли также полетов космических аппаратов.

Первые измерения проводились с маятниковыми приборами с погруженных подводных лодок, а в тихую погоду - с бортов обыкновенных судов [6]. Необходимо отметить, что первые измерения силы тяжести в морских условиях были выполнены еще в 1893-1896 гг. во время экспедиции Ф. Хансена в Северном Ледовитом океане с вмержшего в лед судна, являющегося устойчивым основанием [3].

В 1901-1909 гг. определения силы тяжести на море проводил и немецкий ученый Гельмерт. Ему удалось получить данные о различии сил тяжести над глубоководными районами и у берегов материков, но из-за несовершенства приборов, а также их неустойчивости на корабле во время качки были допущены большие погрешности, которые не позволяли использовать полученный материал для решения геологических задач [3].

Почти четверть века после этого считалось невозможным осуществлять измерения силы тяжести на неустойчивых основаниях, пока в 1923-1924 гг. голландскому ученому Вейнинг-Мейнецу не удалось благодаря специальному приспособлению использовать гравиметр в морских условиях и получить удовлетворительные по точности данные о распределении силы тяжести в морях и океанах [3].

Но, коренной перелом в морском гравиметрическом приборостроении наступил, когда выдающийся советский ученый профессор К.Е. Веселов (ВНИИ геофизика) впервые в мире доказал возможность преодоления принципа эквивалентности сил инерции и сил тяготения. Им было показано, что данные силы могут быть разделены по направлению, по изменчивости во времени и изменчивости в пространстве и что влияние сил инерции можно исключить на основе измерения и соответствующей обработки элементов траектории движения [1]. На этих принципах была построена практически вся морская набортная и аэрогравиметрическая аппаратура в нашей стране и за рубежом. Уже в 1954 году Л.П. Смирнов провел набортные измерения силы тяжести со статическими гравиметрами с большей точностью, чем с маятниковыми приборами. В последующие годы морские статические гравиметры были существенно усовершенствованы (В.О. Баграмянц, К.Е. Веселов, А.И. Райнот и др.) и организован их серийный выпуск на заводе "Нефтекип" под маркой ГМН-К, в приборах этого типа использовалась кварцевая астазированная чувствительная система с жидкостным демпфированием и температурной компенсацией, с обратной связью на основе форсирования и электрической регистрации [1].

Использование морских гравиметров типа ГМН-К при морских съемках показало их

значительную эффективность. Стало возможным проведение кондиционных съемок М 1:200000 на обширных акваториях морей и океанов с набортными гравиметрами. За счет усовершенствования методики измерений (учет поправки Этвеша, учет изменений нуля пункта по донным опорным пунктам, применения цифровых фильтров и т.д.) удалось повысить точность измерений до нескольких десятых миллигала в некоторых случаях и до сотых долей миллигала (В.Г. Буданов, В.О. Баграмянц, И.Я. Французов). Это позволило осуществить в последующие годы кондиционную гравиметрическую съемку нефтегазоносных участков дна Баренцева, Охотского и Карского морей, составить и издать гравиметрические карты масштаба 1:1000000 для Баренцева моря, восточной части Норвежского и западной части Карского морей, а также 1:200000 для Кольского шельфа (В.А. Журавлев, И.Я. Французов, М.М. Павлова).

Создание морских набортных гравиметров позволило осуществлять поиски нефтегазоперспективных структур на больших территориях морей и океанов и даже прогнозировать на них отдельные залежи.

В последующие годы гравиметры ГМН-К совершенствовались путем повышения чувствительности, улучшения термостатирования, введения линейаризации показаний, регистрации показаний многочисленных датчиков на машинном носителе и т.д., что позволило создать новую его модификацию, получившую название ГМН-Флагман (В.О. Баграмянц). Созданием морских набортных гравиметров занимались и другие организации: ИФЗ (Е.И. Попов, Л.К. Железняк, В.А. Тулин и др.), Южморгеология (Л.Д. Немцов и др.), ГАИШ (В.Л. Пантелеев, В.Д. Гладун и др.), Тульский политехнический институт (В.С. Кутепов) [5]. Эти и другие гравиметры, разработка и улучшение которых продолжается до настоящего времени, достигли высокого совершенства и обеспечили становление и развитие морских гравиметрических исследований в нашей стране, однако точность измерений, хотя и в меньшей мере, продолжает зависеть от точности навигационных данных [5].

Создание статических гравиметров для измерений силы тяжести с подвижных оснований подтолкнули развитие и аэрогравиметрии, которая была необходима для изучения труднодоступных территорий. Для этих целей во ВНИИ геофизике в 1956 году был создан струнный гравиметр (А.М. Лозинская, М.С. Давыдов), который можно было применять при гравиметрических съемках с самолетов и вертолетов. В последующие десятилетия во ВНИИ геофизике был разработан целый комплекс аэрогравиметрической аппаратуры (А.М. Лозинская, И.Л. Яшаев, В.О. Баграмянц, М.С. Давыдов, К.Е. Веселов, Ю.К. Рябиков), пригодной для осуществления гравиметрических съемок различного масштаба. Этот комплекс в отличие от морской набортной гравиметрической аппаратуры оснащался приборами для определения высоты полетов и ее вариаций, а также более точной и надежной системой ориентации и стабилизации оси чувствительности гравиметров.

Для измерения высоты и ее вариаций использовались радиовысотометры и барометрические измерители вертикальной скорости, для стабилизации направления оси чувствительности

СТРАННИЦЫ ИСТОРИИ

высокоточная гиropлатформа; для определения горизонтальных координат и скорости аэро-навигационная аппаратура. В связи с наличием в аэрогравиметрическом комплексе многочисленных датчиков возникла проблема согласованной фильтрации и корреляции множества их показаний. Для ее решения во ВНИИгеофизике была разработана специальная автоматизированная система обработки аэрогравиметрических данных, которая обеспечивала точность измерений на самолете при прямолинейном полете около 6 мГал, а на вертолете около 1 мГал. В связи с быстрым совершенствованием спутниковой навигации появилась реальная возможность существенного увеличения точности аэрогравиметрических съемок более чем на порядок, что может приблизит их по точности к наземным съемкам [1].

Необходимо отметить, что точность гравиметрических съемок во многом зависит от точности измерений на опорной сети I класса, которые производятся в нашей стране с помощью маятниковых приборов. Это лишний раз было подтверждено работами ЦНИИ ГАИК (Ю.А.

Славин, Н.А. Гусев), когда в 1964 году ими был изготовлен и испытан новый малогабаритный двухмаятниковый вакуумированный комплекс (ОВМ), позволивший значительно улучшить измерения на сети пунктов I класса.

Средняя квадратическая погрешность на пунктах этой сети оказалась равной 0,033 мГал, а систематическая погрешность, определенная из 14 сравнений, полученных с баллистическими гравиметрами разных стран в интервале 3,5 Гал, была равна нулю.

С ОВМ были выполнены измерения на опорных пунктах 30 государств и определены 10 опорных пунктов в Антарктиде. Точность на антарктических пунктах была во всех случаях не ниже 0,15 мГал.

На базе ОВМ в 1967-1968 гг. был построен морской автоматизированный прибор АМП-1, предназначенный для применения с подводных лодок. Сокращение продолжительности измерений до нескольких минут и полная автоматизация работ была достигнута благодаря реализации предложения М.Е. Хейфеца о цифровой фильтрации единичных колебаний маятников [6].

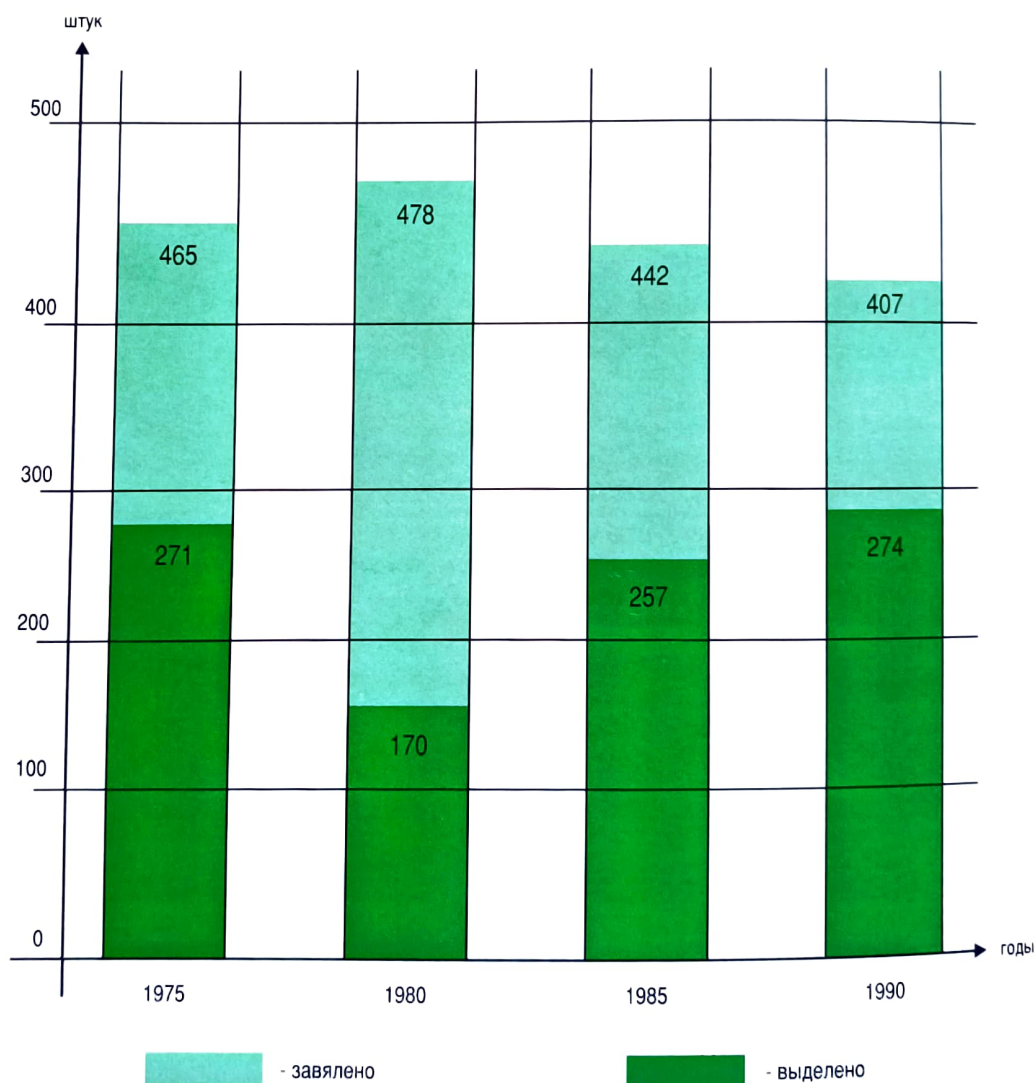


Рис. 1 Удовлетворение потребностей геофизических организаций Мингео СССР полевыми гравиметрами всех типов

Таблица 2 Классификация гравиметрических приборов

ТИП (по состоянию пробной массы - в движении или в покое)	КЛАСС (по принципу измерения)	ВИД (по физическому способу измерения)	ГРУППА (по рабочему месту)	ПОДГРУППА (по способности менять пункты измерений)	ОТДЕЛ (особенность)	МАРКА или рекомендуемое, сокращенное наименование
ДИНАМИЧЕСКИЕ	АБСОЛЮТНЫЕ	ГРАВИМЕТРЫ БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ	НАЗЕМНЫЕ	СТАЦИОНАРНЫЕ		ГАС - гравиметр абсолютный стационарный
				ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ		ГАТ - гравиметр абсолютный транспортабельный
			БОРТОВЫЕ			ГАБ - гравиметр абсолютный бортовой
		ПРИБОРЫ МАЯТНИКОВЫЕ	НАЗЕМНЫЕ	СТАЦИОНАРНЫЕ		МАС - маятник абсолютный стационарный
				ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ		МАТ - маятник абсолютный транспортабельный
			БОРТОВЫЕ			МАБ - маятник абсолютный бортовой
		ВАРИОМЕТРЫ				ДВ - динамический вариометр
		ГРАДИЕНТОМЕТРЫ				ДГ - динамический градиентометр
	ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ	ПРИБОРЫ МАЯТНИКОВЫЕ	НАЗЕМНЫЕ	СТАЦИОНАРНЫЕ		МОС - маятник относительный стационарный
				ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ		МОТ - маятник относительный транспортабельный
			БОРТОВЫЕ			МОБ - маятник относительный бортовой
СТАТИЧЕСКИЕ	АБСОЛЮТНЫЕ	ВАРИОМЕТРЫ				СВ - статический вариометр
		ГРАДИЕНТОМЕТРЫ				СГ - статический градиентометр
	ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ	ГРАВИМЕТРЫ СТРУННЫЕ	БОРТОВЫЕ	МОРСКИЕ		ГБСМ - гравиметр бортовой струнный морской
				АВИАЦИОННЫЕ		ГБСА - гравиметр бортовой струнный авиационный
			СКВАЖИННЫЕ	До 2,5 км - А Глубже - Б		ГСС-А(Б) - гравиметр скважинный струнный
		ГРАВИМЕТРЫ ПРУЖИННЫЕ	НАЗЕМНЫЕ	ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ	УЗКО-ДИАПАЗОННЫЕ	ГНУ - гравиметр наземный узкодиапазонный
				СТАЦИОНАРНЫЕ	ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ	ГНШ - гравиметр наземный широко-диапазонный
			СКВАЖИННЫЕ	До 2,5 км - А Глубже - Б	КОМБИНИРОВАННЫЕ	ГСП-А(Б) - гравиметр скважинный пружинный
			ДОННЫЕ			ГД - гравиметр донный
			БОРТОВЫЕ			ГБП - гравиметр бортовой пружинный

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ



Таблица 3 Параметрический ряд гравиметров и их основные параметры

Параметр	Средняя квадратическая погрешность мГал (10^{-5} мс^{-2}) в рейсах продолжительностью:			
	1 час	4 часа	8 часов	20 суток
1. Гравиметры наземные узкодиапазонные		0,03		
1.1. ГНУ-КВ серийный		0,02		
1.2. ГНУ-КА 1990		0,015		
1.3. ГНУ-1				
2. Гравиметры наземные широкодиапазонные			0,015	
2.1. ГАГ-2 серийный			0,08	
2.2. ГНШ-1 1989			0,06	
2.3. ГНШ-2				
3. Гравиметры донные			0,15	
3.1. ГД-К серийный			0,10	
3.2. ГД-1 1990			0,06	
3.3. ГД-2				
4. Гравиметры скважинные		0,015		
4.1. ГС-110 1987		0,08		
4.2. ГС-А		0,25		
4.3. ГС-Б				
5. Гравиметры пружинные бортовые		1,0	2,5	100
5.1. ГМН серийный		0,6	1,5	150
5.2. ГБП "Флагман" 1990		0,4	1,3	160
5.3. ГБП-2				
6. Гравиметры струнные бортовые морские и авиационные		1,0	2,0	100
6.1. ГАМС макет		0,5	1,5	100
6.2. ГБС-1 1990		0,4	1,0	100
6.3. ГБС-2				
7. Морские гравиметрические комплексы МГК		0,7	1,2	150
7.1. МГК "Океан" 1990		0,4	1,0	180
7.2. МГК-2				
8. Градиентометры -СГ *				
9. Маятники относительные наземные	0,04			
9.1. "Агат" серийный	0,02			
9.2. МСТ				
10. Маятники относительные бортовые			1,0	5
10.1. ПДМ серийный			1,0	15
10.2. МОБ				
11. Маятники относительные стационарные - МОС	0,01			
12. Гравиметры баллистические		0,01		
12.1. ГАБЛ				
12.2. ГАС			0,005 (0,001 за 24 часа)	
12.3. ГАТ			0,03 (0,01 за 24 часа)	

* Средняя квадратическая погрешность градиентометра за 5 минут - $2-5 \text{ с}^{-2}$

Изготовленный для этой цели в 1971 году новый прибор АМП-2 (Э.М. Березин, А.А. Ларин, С.М. Лукашук и др.) был установлен на одном из глубоководных аппаратов и показал хорошие результаты.

Совершенствование маятниковой аппаратуры продолжалось и в последующие годы. В 1971 году был создан маятниковый комплекс "Агат" (Ю.А. Славин, Н.А. Гусев), который имел существенные преимущества по сравнению с ОВМ по точности измерений, по числу приборов, включенных в комплекс, по массе, по потребляемой мощности. Таким образом, появилась возможность заменить статические гравиметры при создании сети I класса маятниковыми приборами и отказаться от аэрогравиметрии при выполнении этих работ. За период с 1978 по 1983 год была создана новая сеть, состоящая из 502 пунктов. Средняя квадратическая погрешность, полученная из уравнивательных вычислений, составила 0,029 мГал, а систематическая по отношению к современным баллистическим измерениям 0,00 - 0,01 мГал [6]. Созданная и закрепленная сеть гравиметрических пунктов I класса на территории СССР является одной из лучших в мире и служит надежной опорой для привязки пунктов II и более низших классов.

Как видно, гравитационные маятниковые приборы не утратили своего значения, они будут и в дальнейшем совершенствоваться для осуществления специальных гравиметрических наблюдений высокой точности.

Особо следует остановиться на скважинной гравиметрии.

В начале 50-х годов П.И. Лукавченко впервые в мире предложил измерять силу тяжести непосредственно в скважинах, разработал и испытал первый металлический скважинный гравиметр [1]. В последующем скважинные гравиметры разрабатывались на базе кварцевых астазированных гравиметров (П.И. Лукавченко, И.Н. Михайлов, М.А. Белкин, К.Е. Веселов). Ими же были разработаны основы теории и технологии гравитационного каротажа. Первые практические результаты по измерению силы тяжести в скважинах были получены в 1958 году с кварцевым скважинным гравиметром ГСК-175. Ошибки измерений в точках наблюдений располагавшихся через 40 и 80 м составляли 0,8 - 1,6 мГал. В последующем был создан гравиметр ГСК-130 с уменьшенным внешним диаметром скважинного прибора равным 130 мм и глубиной применения до 3х км. В 1964-1965 гг. этот прибор был испытан в Башкирии и Татарии и показал точность единичного измерения равной 0,5 мГал при расположении точек через 100 м.

В последующие годы во ВНИИгеофизике шло непрерывное усовершенствование скважинных гравиметров в направлении уменьшения внешнего диаметра, повышения температурного порога и усовершенствования измерительной системы с целью повышения точности наблюдений. В 1958 году был создан скважинный гравиметр диаметром 110 мм (ГСК-110), что расширило возможности применения скважинной гравиметрии для решения геологических задач особенно в нефтегазоразведочных скважинах (разработчики: П.И. Лукавченко, М.А. Белкин). Гравитационный каротаж как метод определения плотности горных пород в условиях

естественного залегания позволял решать как геологические задачи, так и изучать плотность промежуточного слоя и решать вопросы редуцирования наблюдаемого поля силы тяжести.

Методику обработки и интерпретации данных гравитационного каротажа разработали - П.И. Лукавченко, А.С. Варламов, И.Н. Михайлов, Е.М. Петров, М.Ю. Лазарев и Н.А. Дмитриев (ВНИИгеофизика).

Таким образом, в 1950-1990 годах была создана отечественная приборная база гравиметрии, обеспечившая необходимой измерительной техникой производство гравиметрических исследований в различных условиях на поверхности Земли, на море, в воздухе, в скважинах, в шахтах и рудниках. Это позволило гравиразведке занять одно из ведущих мест в общем комплексе геофизических методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, изучения инженерно-геологических и гидрогеологических условий, а также при решении археологических, экологических и других задач.

Страна была полностью избавлена от необходимости импорта гравиметров, что имело немаловажное значение для осуществления независимой государственной политики в обеспечении гравиметрических измерений для нужд народного хозяйства и обороны.

В 80-е годы в различных организациях страны в эксплуатации находилось порядка 1350 гравиметров различного назначения. При общем производстве приборов различного типа на отечественных заводах в количестве 250-270 штук ежегодно, можно было обновлять имеющийся парк на 20-22 %, что являлось неплохим показателем, хотя заявки на гравиметры полностью и не удовлетворялись (рис. 1). Обновление в основном происходило за счет ввода в эксплуатацию гравиметров с повышенной точностью измерений, что позволяло расширять количество решаемых с помощью гравиразведки задач.

В 1984 году гравиметрист В.В. Камянской разработал классификацию современных гравиметрических приборов (таблица 2), а также их параметрический ряд (таблица 3), которые не утратили своего значения и до настоящего времени [4].

Гравиразведка как один из старейших методов изучения Земли будет и в дальнейшем служить человечеству, а измерительные приборы будут постоянно совершенствоваться на базе современных достижений физики, электроники, электротехники и материаловедения.

Литература

1. Веселов К.Е., В.О. Баграмянц. 50 лет гравиразведке во ВНИИгеофизике, состояние, проблемы, перспективы. Прикладная геофизика, М., Недра, 1994, № 131.
2. Горная энциклопедия, том 2. М., изд. Сов. энциклопед., 1986.
3. Ильина Т. Д. Формирование советской школы разведочной геофизики, М., изд. "Наука", 1983.
4. Камянской В.В. Классификация и параметрический ряд гравиметрической аппаратуры. Геофизическая аппаратура. Санкт-Петербург, 1992, вып. 96.
5. Справочник геофизика, том V. М., Недра, 1968.
6. Хейфец М.Е. К истории развития гравиметрической съемки в нашей стране. Геодезия и картография. М., Геодезиздат, 1992, № 4.

СТРАНА И ЕЕ ИСТОРИЯ

