

Исследование выполнено при поддержке РФФИ-ДВО (грант № 11-01-98501-р_восток_a) и ДВО РАН (грант № 12-1-0-03-005).

Л и т е р а т у р а

1. **Иваницкий Г. Р., Медвинский А. Б., Цыганов М. А.** От динамики популяционных волн, формируемых живыми клетками, к нейроинформатике // Успехи физических наук. 1994. Т. 164. № 10. С. 1041—1072.
2. **Олескин А. В.** Нейрохимия и симбиотическая микрофлора человека: биополитические аспекты // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 5. С. 431—438.

3. **Аршавский Ю. И., Гельфанд И. М.** О математике и нейрофизиологии // Вестник РАН. 2010. Т. 80. № 10. С. 937—940.
4. **Павлов А. Н. и др.** Вейвлет-анализ в нейродинамике // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 9. С. 905—938.
5. **Калман Р., Фалб П., Арбиб М.** Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971; **Kalman R. E. et al.** Topics in mathematical system theory. N.Y.: McGraw-Hill, 1969.
6. **Осипов Ю. С., Кряжмский А. В.** Задачи динамического обращения // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 7. С. 615—624.
7. **Андреев В. Д.** Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967.

Дата принятия 24.05.2013 г.

621.3.014.33:389

Концепция индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра

В. Ф. БОЛЮХ*, А. И. ВИННИЧЕНКО**

* Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

** Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков, Украина, e-mail: vinn96@eandex.ua

Предложена конструктивная схема индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра, содержащая неподвижный индуктор и электропроводящий якорь, который вместе с пробным телом перемещается вдоль вертикальной оси. Катапульта позволяет повысить точность гравиметра при прямом преобразовании электрической энергии в кинетическую. Электронная схема катапульты обеспечивает два последовательных импульса тока в индукторе для подбрасывания и торможения якоря в рабочем цикле.

Ключевые слова: баллистический лазерный гравиметр, индукционно-динамическая катапульта, математическая модель, подбрасывание и торможение якоря.

A design scheme of induction-dynamic catapult of laser ballistic gravimeter containing the static inductor and electroconductive armature moving together with the test object along the vertical axis is suggested. The catapult allows to improve the gravimeter accuracy by direct conversion of electrical energy into kinetic. Its electronic circuit provides two successive pulses of current in the inductor for armature tossing and braking during operating cycle.

Key words: ballistic laser gravimeter, induction-dynamic catapult, mathematical model, tossing and braking armature.

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения g применяются баллистические лазерные гравиметры (БЛГ), в которых осуществляется подбрасывание пробного тела (ПТ), представляющего собой оптический уголкового отражателя в специальном корпусе и являющегося составной частью измерительной системы лазерного интерферометра Майкельсона [1—4]. Наиболее точно измерения g проводятся симметричным способом, при котором определяются интервалы пути и времени, пройденные ПТ на симметричных относительно вершины восходящей и нисходящей траекториях свободного движения в вакуумной камере БЛГ [5].

Высокая точность измерения абсолютного значения g достигается на БЛГ — установке ДЕТУ 02-02—96. Однако в полной мере ее метрологические параметры не удовлетворяют современным требованиям, что в значительной степени связано с конструкцией катапульты, в которой осуществляется опосредованное преобразование электрической

энергии источника в вертикальное подбрасывание ПТ [6, 7]. Катапульта данного гравиметра выполнена на основе симметричного шестизвенного рычажного механизма (пантографа) с центральной осью, закрепленной в камере. При подаче на обмотку электромагнита импульса тока массивный ферромагнитный якорь втягивается во внутреннюю полость. Перемещаясь вертикально вниз, он тянет пантограф, который из-за уменьшения радиальных и увеличения аксиальных размеров подбрасывает каретку с ПТ вертикально вверх с последующим улавливанием. Таким образом, в катапulte взаимосвязаны следующие процессы: перемещение якоря под действием магнитного поля обмотки электромагнита, передача электромагнитной силы тяги на центральную ось, поворот секций пантографа вокруг соответствующих осей, перемещение каретки. Для устранения боковых смещений якорь и каретка установлены в подшипниках, связанных со стенками вакуумной камеры.

Такое многоступенчатое преобразование электрической энергии в механическую сопровождается трением и последующим износом контактов подвижных элементов, вибрацией и ударами в соединительных элементах, демпфированием части энергии, изгибно-деформационными процессами и др. Отметим также нелинейность магнитных характеристик и инерционность массивного ферромагнитного якоря, что затрудняет процесс управления катапульты.

Указанные систематические погрешности нельзя уменьшить проведением повторных измерений g , и дальнейшее повышение динамической точности БЛГ связано с совершенствованием катапульты ПТ, в частности с применением дополнительных устройств, например виброзащитных элементов оптико-механической системы. Однако это усложняет конструкцию, увеличивает габаритные размеры и массу БЛГ.

Конструктивная схема индукционно-динамической катапульты. Для устранения систематических погрешностей предлагается БЛГ с индукционно-динамической катапульты (ИДК), обеспечивающей прямое электромеханическое преобразование энергии при свободном и ограниченном перемещении якоря (рис. 1) [8].

Гравиметр содержит ПТ 15 с оптическим уголковым отражателем 16, вакуумную камеру 2, на верхней части которой установлен оптический излучатель 17. На дне 8 вакуумной камеры 2 на демпферах 7 установлена силовая плита 9, на которой зафиксированы катушка 10 с обмоткой 11, направляющие элементы в виде вертикальных стоек 3 и горизонтальные упоры 18 с вертикальными участками 20. В вакуумной камере 2 расположен выполненный в форме тонкого диска электропроводящий якорь 13, который соединен с толкающим диском 4, имеющим отверстия 6 с подшипниками 5, охватывающими вертикальные стойки 3. К нижней части ПТ 15 присоединен направляющий конус 14, форма боковых стенок которого совпадает с формой направляющей конусообразной аксиальной выемки 12 катушки 10. В якоре 13 и диске 4 выполнены центральные отверстия 21.

Нижние части вертикальных стоек 3, обеспечивающих свободное перемещение якоря 13, имеют увеличенный диаметр для подшипников 5 силового диска (см. рис. 1, а). Вертикальные стойки 3, обеспечивающие ограниченное вертикальное перемещение якоря 13, в верхней части соединены с горизонтальными упорами 18, к которым присоединены упругие демпферы 1 (см. рис. 1, б). Установленные на вертикальных участках 20 горизонтальных упоров 18 упругие элементы 19 удерживают якорь 13 с силовым диском при отсутствии взаимодействия ПТ 15 с диском 4.

При разряде емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) на обмотке 11 возникает первый импульс тока, под действием которого магнитное поле наводит ток в электропроводящем

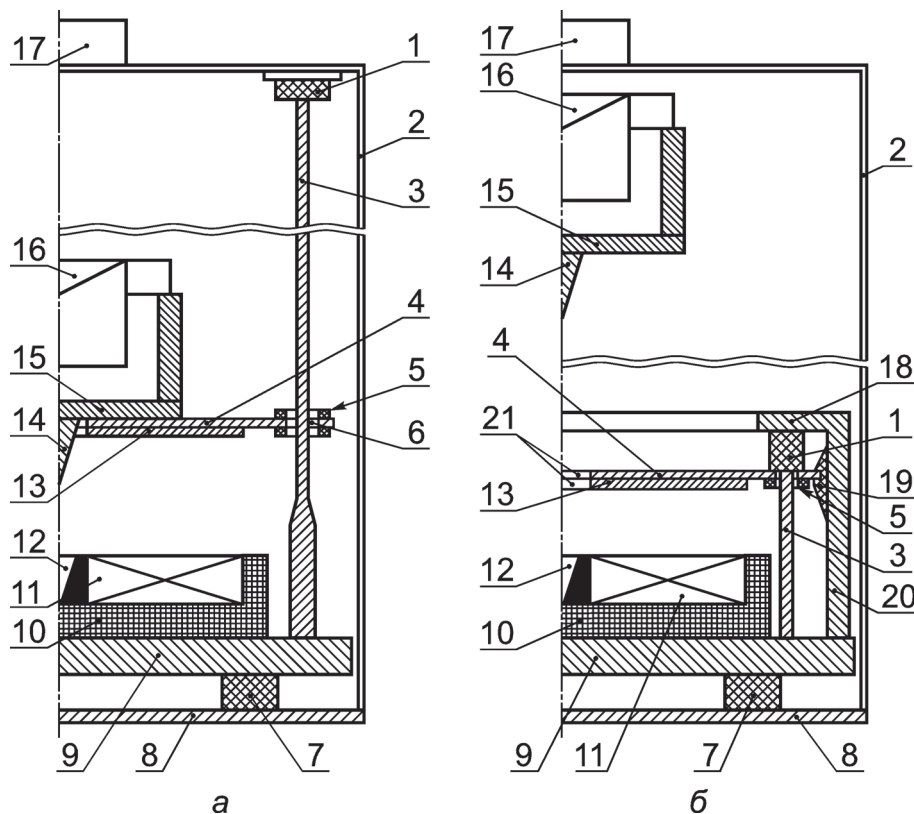


Рис. 1. Конструктивная схема БЛГ с индукционно-динамической катапульты со свободным (а) и ограниченным (б) перемещением якоря в момент свободного полета пробного тела:

1, 7 — демпферы; 2 — вакуумная камера; 3 — стойки; 4 — диск; 5 — подшипники; 6, 21 — отверстия; 8 — днище камеры 2; 9 — силовая плита; 10 — катушка; 11 — обмотка катушки; 12 — конусообразная выемка; 13 — якорь; 14 — направляющий конус; 15 — пробное тело; 16 — уголкового отражатель; 17 — излучатель; 18 — горизонтальный упор; 19 — упругий элемент; 20 — вертикальная опора

якоре 13. Под действием аксиальной электродинамической силы f_z отталкивания якорь 13 вместе с силовым диском 14 и ПТ 15 совершают свободное вертикальное перемещение Δz . При этом включается оптический излучатель 17, воздействующий на оптический уголкового отражатель 16, и осуществляется измерение g . При падении якоря 13 в момент приближения его к обмотке 11 начинается повторный разряд ЕНЭ. Поскольку остаточное напряжение ЕНЭ меньше начального, возникающая электродинамическая сила f_z отталкивания достаточна лишь для плавного торможения якоря 13 с ПТ 15.

При перемещении ПТ 15 по нижним утолщенным участкам вертикальных стоек 3 подшипники 5 задают горизонтальное положение диска 4. Поскольку верхние утонченные части стоек 3 не соприкасаются с подшипниками 5, обеспечивается бесконтактное перемещение ПТ 15, а значит, и максимальная точность измерения g . За счет взаимодействия направляющего конуса 14 с аксиальной выемкой 12 катушки 10 достигается строго аксиальное расположение якоря 13 относительно обмотки 11 как в начале, так в конце рабочего цикла БЛГ.

Гравиметр с ограниченным перемещением якоря работает следующим образом (см. рис. 1, б). Подлетая к горизон-

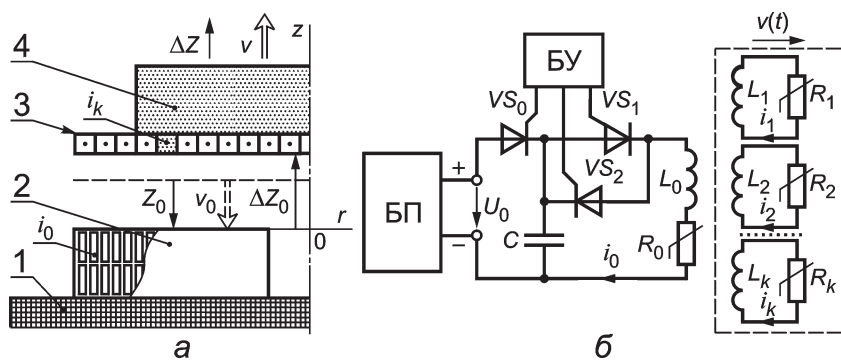


Рис. 2. Расчетная (а) и электрическая (б) схемы ИДК:

1 — основание; 2 — индуктор; 3 — электропроводящий якорь; 4 — пробное тело; БП, БУ — блоки питания и управления

тальным упорам 18, диск 4 сжимает упругие демпферы 1 и элементы 19. При этом диск 4 плавно тормозит, а ПТ 15 продолжает свободное вертикальное движение, в процессе которого выполняется измерение g . Диск 4 с якорем 13 удерживается разжатymi упругими элементами 19. В момент падения ПТ 15 происходит его контакт с диском, элементы 19 разжимаются, и далее осуществляется совместное падение силового диска 4, якоря 13 и ПТ 15.

Рассмотрим электромеханические процессы ИДК со свободным движением ПТ и якоря, выполненного в виде тонкого медного диска.

Математическая модель ИДК. Она содержит неподвижный индуктор (катушку с обмоткой) и электропроводящий якорь, который вместе с ПТ перемещается вдоль вертикальной оси Z . Якорь располагается относительно индуктора на расстоянии Δz_0 , при котором индуктор возбуждается для со-

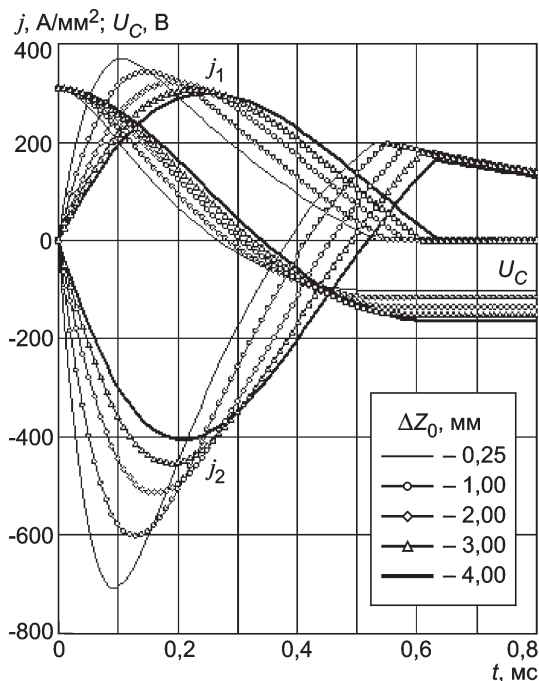


Рис. 3. Зависимости плотности тока индуктора j_1 , усредненной плотности тока якоря j_2 и напряжения ЕНЭ U_C на этапе подбрасывания якоря с ПТ

здания подбрасывающего импульса. В процессе торможения якоря, который падает со скоростью v_0 относительно индуктора, возбуждение последнего происходит в момент, когда расстояние между ними равно z_0 (рис. 2, а).

Для создания двух последовательных импульсов в едином рабочем цикле используется электронная схема, которая содержит блок питания БП, предназначенный для зарядки ЕНЭ C до напряжения U_0 , и блок управления БУ. Последний обеспечивает последовательное открытие тиристоров VS_0, VS_1, VS_2 , зарядку ЕНЭ, выдает импульсы подбрасывания и торможения якоря (рис. 2, б) [8].

Поскольку в электропроводящем якоря индуцированный ток распределен неравномерно, в математической модели он представляется совокупностью элементарных коаксиальных корот-

козамкнутых k контуров, которые равномерно расположены по поверхности диска, а индуктор — первичным контуром возбуждения. Таким образом, математическая модель учитывает изменяемую магнитную связь между якорем и индуктором, неравномерность распределения индуцированного тока в якоря и комплекс аксиальных сил, действующих на якорь. При этом электрические процессы в ИДК можно описать системой дифференциальных уравнений [9]:

$$\begin{cases} R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \frac{di_k}{dt} + v(t) \times \\ \times \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0; \\ R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + v(t) \times \\ \times \left(i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \\ \dots \\ R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \frac{di_{k-1}}{dt} + v(t) \times \\ \times \left(i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0, \end{cases}$$

где i_0, L_0, R_0 — ток, индуктивность и сопротивление индуктора; i_k, L_k, R_k — ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого k -го контура якоря, перемещающегося со скоростью $v(t)$ вдоль оси Z относительно индуктора; M_{kp} — взаимоиנדуктивность между токовыми контурами ($k \neq p$).

Аксиальное перемещение якоря Δz с исполнительным элементом, представляющим собой толкающий диск с ПТ, возникает под действием импульса электродинамической силы

$$F_z = \int_0^t f_z(t, z) dt,$$

где $f_z(t, z) = i_0(t) \sum_{k=1}^k i_k(t) \frac{dM_{0k}}{dz}(z)$ — мгновенное значение силы.

Скорость и перемещение якоря с исполнительным элементом представляются в виде рекуррентных соотношений

$$v(t_{n+1}) = v(t_n) + \vartheta \Delta t / (m_2 + m_3);$$

$$\Delta z(t_{n+1}) = \Delta z(t_n) + v(t_n) \Delta t + \vartheta \Delta t^2 / (m_2 + m_3),$$

где $\vartheta = i_0(t_n) \sum_n i_k(t_n) \frac{dM_{0k}(z)}{dz} + (-1)^m g(m_2 + m_3)$; m_2, m_3 — массы якоря и исполнительного элемента, соответственно; $m = 1$ при восходящей и $m = 2$ при нисходящей траекториях свободного движения.

Основные параметры ИДК БЛГ: внешний диаметр индуктора 80 мм, его внутренний диаметр 4 мм, высота 5 мм; внешний диаметр якоря 80 мм, высота 2 мм; число витков индуктора 76, сечение провода 0,4×5,0 мм; масса исполнительного элемента 0,120 кг; напряжение на ЕНЭ 310 В, его емкость 500 мкФ. Эффективность катапульты будем оценивать максимальной высотой h_m перемещения ПТ на этапе подбрасывания и его минимальной скоростью v_1 относительно индуктора на этапе торможения.

Моделирование процессов ИДК в рабочем цикле. На этапе подбрасывания ПТ вертикально вверх из-за изменяемой магнитной связи плотность тока индуктора j_1 и усредненная плотность тока якоря j_2 меняются негармонически (рис. 3). Чем больше начальный зазор между якорем и индуктором Δz_0 , тем меньше коэффициент магнитной связи в начальном положении:

$$K_m(0) = \sum_{k=1}^K M_{0k}(0) \left(KL_0 \sum_{k=1}^K L_k \right)^{-0,5},$$

что приводит к уменьшению плотности токов в индукторе j_{1m} и якоря j_{2m} . С увеличением начального зазора Δz_0 максимальные значения токовых импульсов сдвигаются во времени, и форма импульсов стремится к гармонической. При этом уменьшаются силовые показатели ИДК (см. таблицу). Так, при увеличении Δz_0 с 0,25 до 4,0 мм максимальное значение электродинамической силы f_{zm} уменьшается практически в 3 раза, тогда как импульс силы F_z — только в 1,88 раз. Вследствие этого высота подбрасывания h_m уменьшается в 3,71 раза, а скорость падения v_0 — в 1,96 раз. При этом остаточное напряжение ЕНЭ противоположной полярности U_{C1} возрастает в 1,62 раза.

Электромеханические параметры ИДК на этапе подбрасывания ПТ

Δz_0 , мм	j_{1m} , А/мм ²	j_{2m} , А/мм ²	$K_m(0)$	f_{zm} , кН	F_z , Н·с	U_{C1} , В	h_m , м	v_0 , м/с
0,25	368,6	707,0	0,933	4,131	0,688	100,9	0,512	3,14
1,0	341,7	602,0	0,888	3,024	0,599	117,2	0,385	2,67
2,0	321,5	513,6	0,832	2,210	0,504	135,9	0,269	2,23
3,0	308,5	452,2	0,781	1,712	0,428	151,1	0,192	1,90
4,0	299,5	405,3	0,734	1,369	0,366	163,5	0,138	1,60

Таким образом, с увеличением начального зазора Δz_0 уменьшается высота подбрасывания h_m якоря с ПТ, однако улучшаются показатели, необходимые для этапа торможения: скорость падения v_0 уменьшается и остаточное напряжение ЕНЭ U_{C1} возрастает.

Торможение падающего якоря с ПТ осуществляется путем подачи сигнала с БУ на тиристор VS_2 в момент нахождения якоря относительно индуктора на расстоянии z_0 (см. рис. 2). Коэффициент торможения

$$K_T = W_{k0} / W_{k1},$$

где W_{k0}, W_{k1} — соответственно кинетическая энергия при отсутствии и наличии тормозного импульса, зависит от расстояния z_0 между падающим якорем и индуктором, при котором начинается его возбуждение, и от начального зазора Δz_0 при подбрасывании якоря с ПТ (рис. 4). Чем меньше Δz_0 , тем сильнее падает коэффициент торможения в зависимости от расстояния z_0 .

Итак, с увеличением начального зазора Δz_0 между якорем и индуктором уменьшается высота подбрасывания h_m , но улучшаются тормозные показатели ИДК. При этом расстояние z_0 между падающим якорем и индуктором, когда начинается его возбуждение, должно быть около 0,5 мм.

Закключение. Предлагаемая ИДК позволяет повысить точность баллистического гравиметра благодаря прямому преобразованию электрической энергии в кинетическую. При этом упрощается конструкция, уменьшаются габаритные размеры и масса, и появляется возможность изменения высоты подбрасывания ПТ в заданном диапазоне регулированием зарядного напряжения U_0 ЕНЭ. Увеличение начального зазора между якорем и индуктором позволяет уменьшить высоту подбрасывания якоря с ПТ при улучшении тормозных показателей ИДК.

Л и т е р а т у р а

1. Витушкин Л. Ф. и др. Лазерные интерферометры перемещений с субнанометровым разрешением в абсолютных баллистических гравиметрах // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 3—8; Vitushkin L. F. et al. Laser displacement interferometers with subnanometer resolution in absolute ballistic gravimeters // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 3. P. 221—228.
2. Арнаутков Г. П. Результаты международных метрологических сравнений абсолютных лазерных баллистических гравиметров // Автометрия. 2005. Т. 41. № 1. С. 126—136.
3. Niebauer T. M. et al. A new generation of absolute gravimeters // Metrologia. 1995. V. 32. N 3. P. 159—180.
4. Бунин И. А. и др. Полевой абсолютный лазерный баллистический гравиметр // Автометрия. 2010. Т. 46. № 5. С. 94—102.

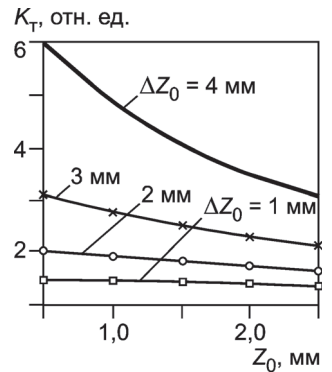


Рис. 4. Зависимости коэффициента торможения от положения якоря относительно индуктора, при котором начинается его возбуждение

5. Пат. 2192024 РФ. Баллистический гравиметр для симметричного способа измерений / В. Б. Гужов, Н. Н. Кокошкин, В. Д. Шурубкин // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 18.

6. Светлов С. М. Динамическая точность баллистических гравиметров в условиях вибрационных помех // Работы по исследованию баллистических гравиметров: Сб. науч. трудов Л.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1988. С. 60—71.

7. Вінніченко О. І. Кінематичні схеми пускових пристроїв балістичних гравіметрів // Метрологія та прилади. 2012. № 3 (35). С. 47—53.

8. Пат. 96904 України. Балістичний гравіметр з індукційно-динамічним приводом для симетричного способу вимірювань прискорення вільного падіння / В. Ф. Болюх, О. І. Вінніченко // Бюл. 2011. № 20.

9. Болюх В. Ф. и др. Высокоэффективный электромеханический преобразователь ударного действия // Электротехника. 2011. № 2. С. 46—53.

Дата принятия 17.07.2013 г.

528.27

Мониторинг современных вертикальных движений Северного Кавказа абсолютными и относительными гравиметрами

В. К. МИЛЮКОВ*, В. Д. ЮШКИН*, А. В. КОПАЕВ*, А. П. МИРОНОВ*,
Г. В. ДЕМЬЯНОВ**, Р. А. СЕРМЯГИН**, А. В. БАСМАНОВ**, В. В. ПОПАДЬЕВ**,
И. Ф. НАСРЕТДИНОВ**, В. Б. ЗААЛИШВИЛИ***, А. КАНУКОВ***,
Б. ДЗЕРАНОВ***

* Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ, Москва, Россия,
e-mail: milyukov@sai.msu.ru

** Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии
им. Ф. Н. Красовского, Москва, Россия

*** Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН-РСО-А,
Владикавказ, Россия

Представлены результаты измерений абсолютных значений ускорения свободного падения g на семи пунктах Северо-Кавказского региона, образующих опорную сеть для контроля вертикальных движений региона гравиметрическим методом. Для распространения сети на другие участки региона разработана методика, основанная на измерении Δg между новым и опорным пунктами высокоточным относительным гравиметром.

Ключевые слова: вертикальные движения земной коры, сила тяжести, абсолютные и относительные гравиметры.

Results of absolute gravity measurements on seven sites of Northern Caucasus region, which form a reference network for control of vertical movements of the region by a gravimetric method, are presented. To spread this network to other parts of the region without carrying out expensive absolute measurements, the technique based on measurement of the gravity increment between the new and reference sites by the high-precision relative gravity meter is developed. Two-years observations showed availability of this technique, nevertheless, for reliable determination of the site vertical movements, the observations on longer time interval are necessary.

Key words: vertical movements of the crust, gravity, absolute and relative gravity meters.

Абсолютная гравиметрия на Северном Кавказе была основана в 1994 г. в рамках международного проекта SELF (Sea Level Fluctuations). В том же году совместно со специалистами института IFAG (Германия) баллистическим гравиметром FG5 № 101 в Баканской подземной обсерватории ГАИШ (п. Нейтрино, Кабардино-Балкария) и Зеленчукском филиале Института прикладной астрономии РАН (ст. Зеленчукская, Карачаево-Черкесия) были заложены абсолютные гравиметрические пункты [1]. Спустя 13 лет в 2007 г. специалистами ГАИШ и ЦНИИГАИК баллистическим гравиметром FG5 № 110 были проведены повторные измерения абсолютного значения силы тяжести на пунктах «Зеленчукская»

(код пункта ZECK) и «Нейтрино» (код NTRN). В 2008 г. тем же баллистическим гравиметром были выполнены повторные измерения на пункте «Нейтрино» и заложены два новых пункта в Приэльбрусье: «Азау» (код AZAU) у подножия Эльбруса (Гляциологическая станция МГУ, Кабардино-Балкария) и «Терскол» (код TRSK) на пике Терскол (Международная астрономическая обсерватория, Кабардино-Балкария). Наконец, в 2009 г. баллистическим гравиметром ГАБЛ-М были проведены повторные измерения абсолютного значения g на пунктах «Азау» и «Зеленчукская» и заложены три новых пункта в Северо-Кавказском регионе: «Нальчик» (Кабардино-Балкарский государственный университет,