

УДК 550.831.23:550.312

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ АБСОЛЮТНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ФУНДАМЕНТАЛЬНОМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОМ ПУНКТЕ “ЛЕДОВО” И ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РОССИИ ПЕРВОГО КЛАССА

© 2023 г. В. Н. Конешов<sup>1, 3, \*</sup>, Н. В. Дробышев<sup>1</sup>, Р. А. Сермягин<sup>2, \*\*</sup>, Е. П. Разинькова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Владимирский государственный университет им. А.Г. Столетова и Н.Г. Столетова, г. Владимир, Россия

\*E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

\*\*E-mail: sermyagin\_ra@nsdi.rosreestr.ru

Поступила в редакцию 18.01.2023 г.

После доработки 18.05.2023 г.

Принята к публикации 21.05.2023 г.

Целью данной работы является оценка многолетних продолжающихся измерений ускорения силы тяжести на фундаментальном гравиметрическом пункте “Ледово” и пунктах первого класса гравиметрической сети РФ. Наблюдения выполняются абсолютными гравиметрами начиная с середины семидесятых годов по настоящее время. Показано, что на пункте “Ледово” за последние 45 лет наблюденное значение ускорения силы тяжести имеет тренд к уменьшению, по нашим оценкам значение снизилось на 32 мкГал. Приведены результаты сравнения измерений на гравиметрических пунктах первого класса на территории России, проведенных в восьмидесятых годах после возобновления поддержания сети с измерениями.

*Ключевые слова:* абсолютный гравиметр, гравиметрический пункт, изменение ускорения силы тяжести, гравиметрическая сеть.

**DOI:** 10.31857/S0002333723060091, **EDN:** MZFCAD

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время геофизики всего мира большое внимание уделяют вопросам геодинамики. Это связано с тем, что с изменением климата наблюдаются не только увеличение уровня Мирового океана, но и локальные деформации поверхности Земли, приводящие к изменению силы тяжести.

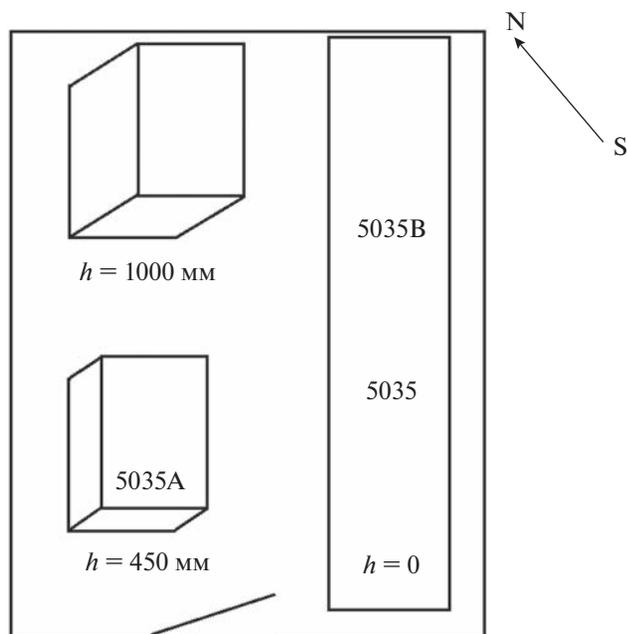
Если периодические изменения значений силы тяжести можно заранее вычислить путем использования различных способов [Рикитаке, 1979; Чечкин, 1990; Юзefович, Огородова, 1980], то определение неприливных изменений вызывает трудности. Еще в 1953 г. профессор Л.В. Сорокин писал: “Для скорейшего решения вопроса о величине таких вековых (непериодических) изменений силы тяжести очень желательным ставить повторные, возможно, более тщательные определения силы тяжести в нескольких избранных пунктах” [Сорокин, 1953].

Так, например, для изучения изменения силы тяжести из-за регионального поднятия в Фен-

носкандии [Müller et al., 2012] в течение более пяти лет применялся комплекс геофизических и геодезических методов. В него входили наряду со спутниковой информацией, непрерывной информацией GPS-наблюдений, данными приливных станций, информация об абсолютных измерениях более чем в 30 пунктах Скандинавии. В результате была оценена точность работы каждого метода и доказано локальное поднятие земной поверхности этого региона. Одна из гипотез связывает это поднятие с “последниковым” периодом и разгрузкой в данном регионе массы литосферы Скандинавии. Этот постледниковый “отскок” оказывает влияние не только на вертикальное, но и на горизонтальное движения земной коры.

В России для изучения гравитационного поля, фигуры Земли и их изменений во времени существует Государственная гравиметрическая сеть.

Одним из важнейших пунктов этой сети является фундаментальный гравиметрический пункт



**Рис. 1.** Расположение пунктов и постаментов в лаборатории. Относительная высота постаментов обозначена буквой  $h$ , так же приведены условные обозначения гравиметрических пунктов.

“Ледово”, на котором с середины семидесятых годов выполняются гравиметрические наблюдения.

### УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Фундаментальный гравиметрический пункт “Ледово” находится в лабораторном корпусе экспедиционной базы ИФЗ РАН в помещении гравиметрической лаборатории [Boulanger et al., 1974]. На рис. 1 приведена схема расположения гравиметрического пункта и постаментов в лаборатории.

Фундаментальный гравиметрический пункт “Ледово” расположен в 300 метрах от Шелковского шоссе с интенсивным движением, которое создает высокий уровень микросейсм. Многолетняя практика убедила в том, что гравиметрические измерения, выполненные в дневное время, особенно абсолютными гравиметрами, обычно получают низкой точности. Поэтому наблюдения проводились в основном с 20 ч вечера до 6 ч утра.

Уровень грунтовых вод в районе гравиметрического пункта стабилен за счет поддержания постоянного уровня воды в обширном водоеме, расположенном в сорока пяти метрах от гравиметрического постамента.

Известно, что при высокоточных как абсолютных, так и относительных измерениях силы тяжести, на пунктах проведения измерений необходимо самым тщательным образом экспериментально

изучать распределение гравитационного поля над постаментом. Величина неравномерности распределения поля может во много раз превышать точностные характеристики современных гравиметрических приборов, и особенно это может проявляться при согласовании работ, выполненных абсолютными приборами различных типов, а также при связи этих значений со значениями, полученными при работах с относительными гравиметрами [Арнаутов, 1979; Буланже, 1981; Хейфец, 1981; Marson et al., 1981; Reicheneder, 1968; Штейман и др., 1984; Сагитов, 1983; 1984а; 1984б; Рукавишников, Пушина, 1982].

Для определения реального распределения гравитационного поля над постаментами в гравиметрической лаборатории Ледово были выполнены измерения малых приращений силы тяжести, расположенных как по вертикали, так и в горизонтальном направлении с использованием высокоточных кварцевых астазированных гравиметров Содин [Рукавишников, Пушина, 1983; 1984; 1986]. По оценке многократных измерений в этих работах, линейный вертикальный градиент над пунктом 5035 составляет  $309.1 \pm 1.0$  мкГал/м.

В связи с возросшей точностью современных гравиметрических приборов линейного определения вертикального градиента на гравиметрических пунктах недостаточно для учета влияния локального притяжения [Charles et al., 1995]. Как правило, для учета нелинейности вертикального градиента используют аппроксимацию полиномом второй или более высокой степени по измерениям на многих станциях, где число станций больше трех в отличие от рядовых наблюдений, где число станций не превышает трех. Такой подход используется, например, в ключевых сравнениях абсолютных гравиметров [Jiang et al., 2009; 2012]. Другой подход предлагается в работе [Mäkinen, 2010], где вертикальный градиент моделируется притяжением постаментов. Также возможен способ определения градиента непосредственно по интерференционному сигналу в абсолютных баллистических гравиметрах.

В 2015 и 2016 гг. работниками ФГБУ “Центр геодезии, картографии и ИПД” на трех станциях гравиметрами CG-5 Autograv были выполнены повторные определения вертикального градиента ускорения силы тяжести на гравиметрическом пункте “Ледово”.

Результатом наблюдений являются коэффициенты полинома второй степени, и таким образом формулу для определения вертикального градиента над маркой постамента можно записать в следующем виде:

$$\delta g_h = 319.98h - 7.30 \times 10^{-8}h^2,$$

где  $h$  – высота над постаментом.

Изменение значения вертикального градиента над постаментом может быть вызвано как техногенными, так и геофизическими факторами, например, локальным подъемом земной поверхности.

Целесообразно выполнение измерений вертикального градиента с установкой гравиметра CG-6 Autograv на большем количестве станций для более точной аппроксимации значения вертикального градиента.

Распределение поля на поверхности постамента 5035 представлено на рис. 2, изолинии проведены через 3 мГал. Наглядно видно, что поле далеко не равномерно, как это следует из теории [ИГ-78 ..., 1979; Леонтьев, 2003]. Абсолютный экстремум величины поля силы тяжести располагается в центре постамента, а к краям его значение уменьшается. На распределение поля в данном случае оказывает влияние не только форма постамента, но и конфигурация помещения, в котором постамент находится.

#### АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ФУНДАМЕНТАЛЬНОМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОМ ПУНКТЕ “ЛЕДОВО”

С середины семидесятых годов на постаменте 5035 фундаментального гравиметрического пункта “Ледово” проводятся абсолютные наблюдения ускорения силы тяжести. Большинство наблюдений выполнялись гравиметром ГАБЛ и его модификациями специалистами ИАиЭ СО АН СССР [Арнаутков и др., 1979]. С появлением в России импортных абсолютных гравиметров измерения так же выполнялись гравиметрами FG5 и A10 специалистами ФГБУ “Центр геодезии, картографии и ИПД” и ИФЗ РАН. Сличение абсолютных гравиметров выполнялось неоднократно на пункте “Ледово”. Последнее сличение было выполнено в 2002 г. Систематическая погрешность не превышала 6 мГал.

В табл. 1 приведены данные об абсолютных наблюдениях на фундаментальном гравиметрическом пункте “Ледово” и значения изменения ускорения с момента начала наблюдений.

На рис. 3 представлен график изменения во времени величины ускорения свободного падения для этого пункта наблюдения.

Из рис. 3 можно сделать вывод о том, что за последние 45 лет ускорение силы тяжести на фундаментальном гравиметрическом пункте “Ледово” имеет тренд к уменьшению, по нашим оценкам значение снизилось на 32 мГал. В этом случае среднее изменение силы тяжести составляет около 0.7 мГал в год. Сделать вывод о причинах такого изменения силы тяжести по данным на одной точке затруднительно. Это может быть как техногенное воздействие, так и возможное локальное поднятие точки наблюдения (увеличение

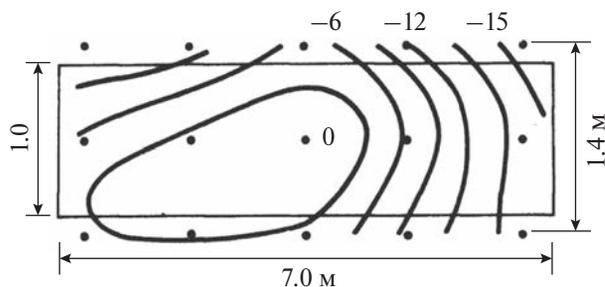


Рис. 2. Распределение поля силы тяжести на поверхности постамента 5035. Изолинии проведены через 3 мГал. Погрешность измерения составила 1 мГал.

расстояния от центра масс Земли). Техногенное происхождение изменения проверить практически невозможно, а гипотезу о том, что изменение силы тяжести связано с региональным поднятием можно оценить только по измерениям на региональной гравиметрической сети первого класса.

Оценка изменений значений ускорения свободного падения на пунктах первого класса на территории всей России ранее не проводилась из-за отсутствия необходимой информации.

#### ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ПУНКТАХ СЕТИ ПЕРВОГО КЛАССА

С появления в ЦНИИГАиК двух опытных образцов полевых малогабаритных баллистических гравиметров ГБЛ-М в 2011 г. возобновились абсолютные определения ускорения силы тяжести на пунктах государственной гравиметрической сети. Повторные измерения выполнялись на существующих пунктах государственной гравиметрической сети 1 класса, которая преимущественно развивалась в 1980-х годах, а в некоторых районах сгущение сети выполнялось вплоть до середины 1990-х годов. Сеть была создана относительно методом с использованием маятниковых комплексов “Агат”. Уравнивание выполнялось с опорой на фундаментальные пункты, определенные баллистическим гравиметром Академии наук ГАБЛ, а затем и отраслевыми баллистическими гравиметрами ГБЛ. История развития сети подробно описана в книге [Бровар, 2010] и докладе [Demjanov, 2013].

Накопленные повторные наблюдения на гравиметрических пунктах сети 1 класса могут быть использованы для изучения геодинамических процессов. Средний временной интервал между повторными измерениями составляет 30 лет. По полученным данным была составлена карта изменений значений силы тяжести (рис. 4).

Эффект изменения ускорения силы тяжести может быть обусловлен вертикальными движениями земной коры. Одним из способов определе-

Таблица 1

№ п/п	Прибор	Дата	Изменение (мкГал)
1	ГАБЛ	02–05.07.1976	0
2	ГАБЛ	25–26.07.1976	10
3	ГАБЛ	07–08.12.1976	–2
4	ГАБЛ	27.12.1976	0
5	ГАБЛ	29.08.1977	–1
6	ГАБЛ	29–30.09.1977	–7
7	ГАБЛ	24.08–01.09.1978	–7
8	ГАБЛ	17.11.1978	–10
9	ГАБЛ	04–08.04.1979	7
10	ГАБЛ	08–09.06.1979	16
11	ГАБЛ	04–06.06.1980	–6
12	ГАБЛ	03–06.08.1980	1
13	ГАБЛ	21.04.1981	3
14	ГАБЛ	21.04.1981	2
15	ГАБЛ	10.02.1982	17
16	ГАБЛ	14–16.03.1983	41
17	ГАБЛ	25–30.10.1983	14
18	ГАБЛ	13.12.1983	20
19	ГАБЛ	10–12.07.1984	–19
20	ГАБЛ	18–19.07.1985	5
21	ГАБЛ	26.03–1.04.1986	8
22	ГАБЛ	13.04.1987	–1
23	ГАБЛ	25–26.11.1987	–9
24	ГАБЛ	02–03.11.1988	5
25	ГАБЛ	15–16.03.1989	–1
26	ГАБЛ	24.11.1989	–7
27	ГАБЛ	18.04.1994	–20
28	ГАБЛ	2008	–8
29	A10	2010	–34
30	A10	2010	–39
31	ГБЛ-М №002	2012-03-19	–23
32	ГБЛ-М №001	2012-05-14	–24
33	ГБЛ-М №002	2015-04-09	–19
34	ГБЛ-М №002	2016-05-28	–12
35	FG5 №110	2017-08-28	–31
36	FG5 №110	2018-06-25	–29
37	FG5 №110	2019-07-01	–32

ния вертикальных движений является повторная нивелировка. К сожалению, из-за дороговизны геометрического нивелирования, объемы таких работ в последние десятилетия ничтожно малы. Тем не менее, в 1989 г. коллективом авторов из большого числа предприятий ГУГК и ЦНИИГАиК по непосредственным руководством Кашиной Л.А. была составлена “Карта современных вертикаль-

ных движений земной коры СССР” (СВДЗК) [Кашина, 1989]. В 2010 г. карта СВДЗК была оцифрована, и построена регулярная сетка СВДЗК (рис. 5).

Используя карту современных вертикальных движений (рис. 5) и карту изменения ускорения силы тяжести, приведенную на рис. 4, можно выполнить качественное сравнение на предмет их совпадения или корреляции. Их совместное рас-

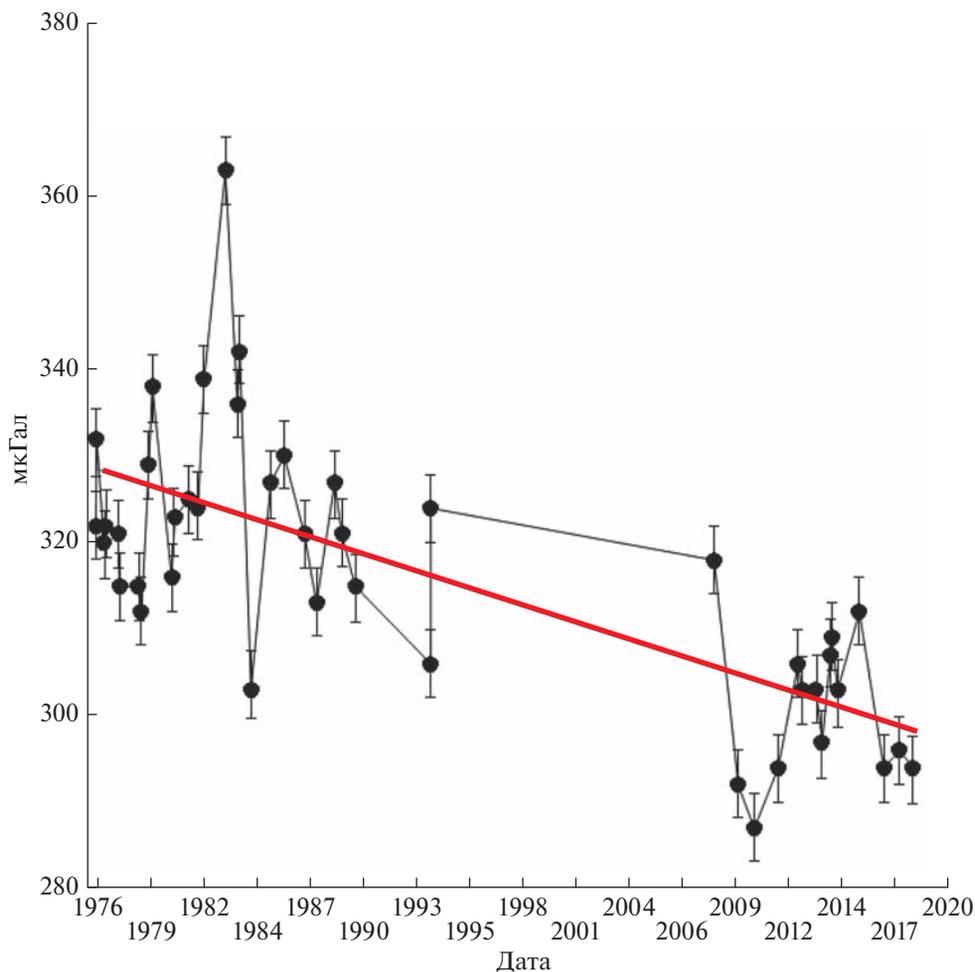


Рис. 3. График изменение ускорения силы тяжести на фундаментальном гравиметрическом пункте "Ледово".

смотрение позволяет сделать первые качественные выводы:

1. Изменение силы тяжести и высот в точках земной поверхности носит региональный характер.

2. На картах присутствуют локальные поднятия и уменьшение силы тяжести, например, в районе Кольского полуострова. Возможно это прослеживается продолжение поднятия Фенноскандии как в гравиметрических, так и в геодезических наблюдениях.

3. Аналогичным локальным поднятием может быть объяснено уменьшение силы тяжести на фундаментальном гравиметрическом пункте "Ледово".

4. Региональные увеличения силы тяжести в Европейской части России совпадает с отрицательными скоростями изменения высот движения земной поверхности. О современном интенсивном вертикальном и горизонтальном движении района северо-западного Кавказа и горного Крыма написаны многочисленные публикации. Горный Крым характеризуется большой положи-

тельной аномалией (более 250 мГал), в редукции Фая, что показывает отсутствие изостазии в этом районе и обуславливает вертикальные и горизонтальные региональные перемещения земной коры юго-востока Крыма. Большой положительный максимум аномалий гравитационного поля продолжается до юга Керченского пролива, где "кулисообразно" переходит в большой положительный максимум в районе Анапы ("Анапский" максимум) и продолжается вплоть до Туапсе, где далее переходят в максимумы хребта большого Кавказа. Наличие больших аномалий, смыкающихся с аномалиями горного Крыма, позволяет предположить общую структуру современных движений в этом регионе. В настоящее время специалисты ФГБУ "Центр геодезии, картографии и ИПД" проводят работы по созданию автоматизированной системы непрерывного геодезического (геодинамического) мониторинга деформации земной поверхности. Она позволит непрерывно отслеживать основные параметры движения тектонических плит, на территории Российской Федера-

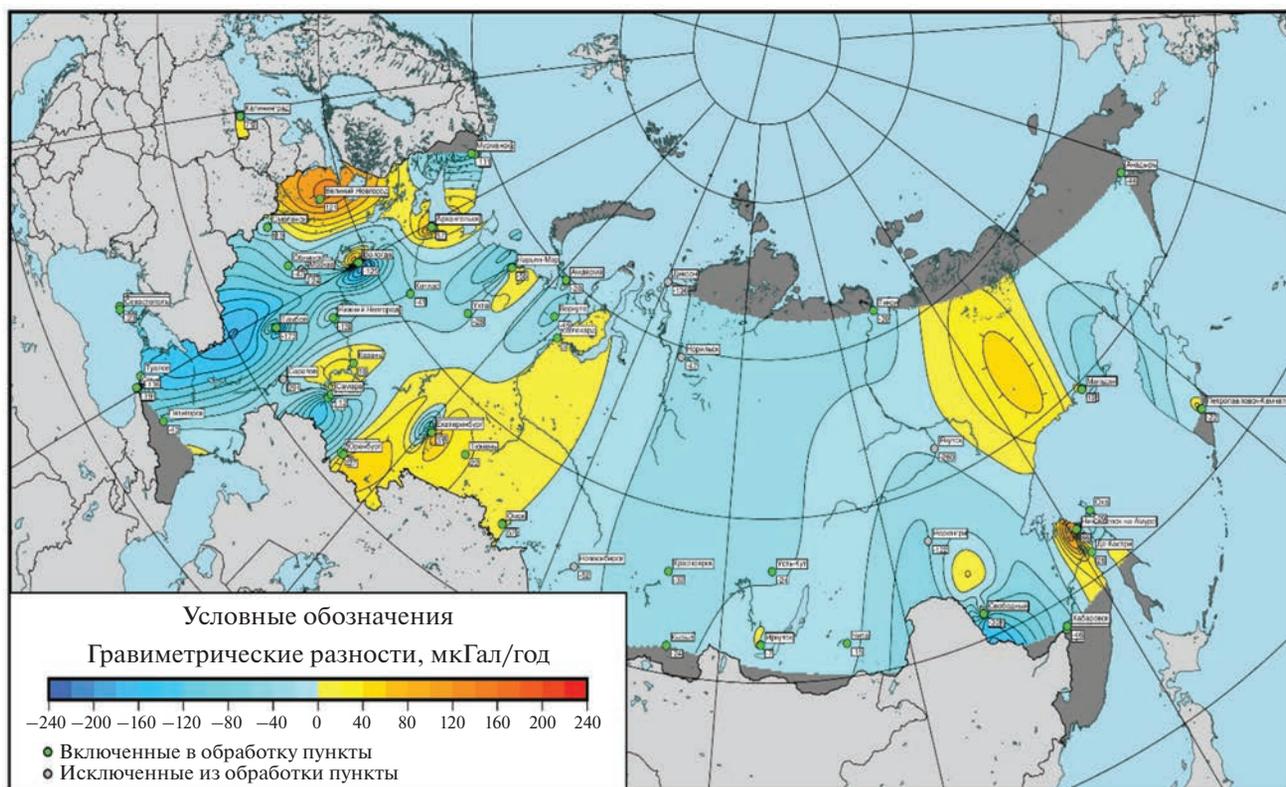


Рис. 4. Карта распределения изменений силы тяжести на гравиметрических пунктах 1 класса за период 30 лет.

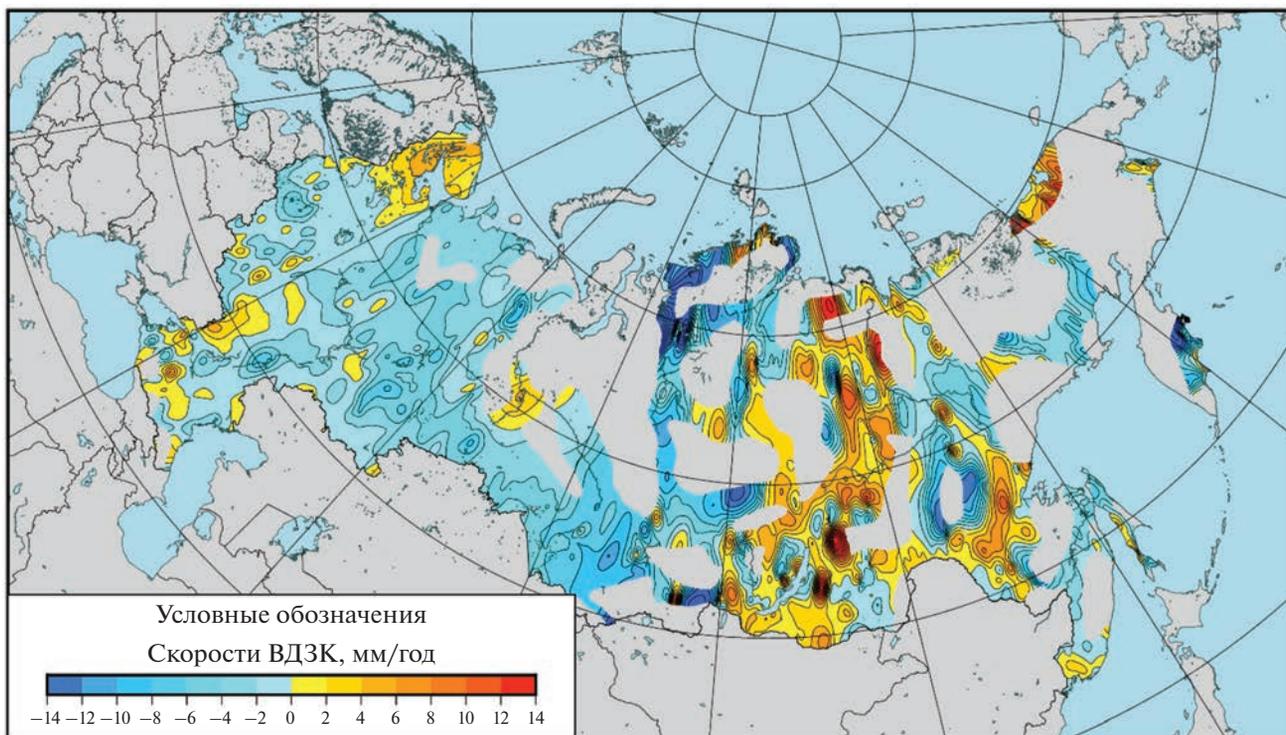


Рис. 5. Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территории Российской Федерации.

ции. Первые результаты работы системы подтверждают факты, приведенные в данной статье. Так, по данным разрабатываемой системы, район Балтийского тектонического щита испытывает поднятие до 6 мм/год. Скорость поднятия в Кавказском регионе достигает до 10 мм/год в отдельных районах Республики Армения.

5. Отсутствие необходимой густоты точек гравиметрических и геодезических измерений на восток от Уральского хребта позволяет наблюдать только фрагментарную корреляцию между изменением силы тяжести и скоростями изменения высот точек измерения.

В этих условиях особую важность приобретает гравиметрическая сеть России первого класса, предназначенная для определения абсолютных значений деформации земной поверхности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом гравиметрических наблюдений на пунктах первого класса, является то, что наблюденные значения ускорения силы тяжести могут изменяться. Величина изменений может составлять десятки микрогалл.

Приведенные в данной статье данные показали необходимость строгого выполнения методических рекомендаций по поддержанию сети первого класса. В них содержатся предложения по периодичности абсолютных гравиметрических измерений по сети пунктов первого класса, создания сети сгущения пунктов наблюдений и комплексирования этих измерений с геодезическими наблюдениями.

Необходимо отметить важность метрологического контроля в гравиметрии и геодезических исследованиях при использовании различных типов гравиметров в различные эпохи наблюдений.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность предыдущим поколениям гравиметристов и, в первую очередь, Ю.Д. Буланже, позволившим выполнить эту работу.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено по государственному заданию Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и гранту РНФ 22-17-20035.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Арнаутов Г.П.* Измерение абсолютного значения ускорения силы тяжести лазерным баллистическим гравиметром // Квантовая электроника. 1979. Т. 9. С. 333–337.

*Бровар Б.В.* Гравиметрия и геодезия, М.: Научный мир. 2010. 570 с.

*Буланже Ю.Д.* Результаты первого международного сравнения абсолютных гравиметров. Севр // Известия АН СССР. 1981 г. С. 43–51.

*Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1979.

ИГ-78 Инструкция по морской гравиметрической съемке (ИГ-78). М. 1979.

*Кашина Л.А.* Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР (СВДЗК). Масштаб 1 : 5000000, под руководством ГУГК СССР. 1989.

*Леонтьев В.И.* Методы и способы повышения точности гравиметрической аппаратуры. М.: Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. 2003.

*Рукавишников Р.Б., Пущина Л.В.* Измерение малых приращений ускорения силы тяжести гравиметрами Содин. Повторные гравиметрические наблюдения. М.: Нефтегеофизика. 1982. С. 69–78.

*Рукавишников Р.Б., Пущина Л.В.* Приведение наблюденного значения ускорения силы тяжести. Повторные гравиметрические наблюдения. М.: Нефтегеофизика. 1983. С. 19–31.

*Рукавишников Р.Б., Пущина Л.В.* Приведение наблюденного значения ускорения силы тяжести. Метрология в гравиметрии. Харьков. 1984. С. 100–102.

*Рукавишников Р.Б., Пущина Л.В.* Неоднородность поля силы тяжести над постаментом // Докл. АН СССР. 1986. Т. 286. С. 328–330.

*Сагитов М.У.* Неоднородность гравитационного поля помещения и выбор места для проведения гравитационных экспериментов // Известия АН СССР. М.: Наука. 1983. С. 41–43.

*Сагитов М.У.* Возможная интерпретация расхождения результатов определения абсолютной силы тяжести в Севре // Докл. АН СССР. 1984а. Т. 274. С. 300–304.

*Сагитов М.У.* Фундаментальные гравитационные эксперименты, высокоточные взвешивания и камерная гравиметрия // Метрология в гравиметрии. 1984б. С. 6–9.

*Сорокин Л.В.* Гравиметрия и гравиметрическая разведка. Л.: Гостоптехиздат. 1953.

*Хейфец М.Е.* Способ редукции результатов измерения силы тяжести в заданной точке Патент : 800937. 1981.

*Чечкин С. А.* Основы геофизики. Л.: Гидрометеоздат. 1990. ISBN: 5-286-00436-9.

*Штейман М.Б., Рукавишников Р.Б., Леонтьев И.А.* К вопросу о высокоточных измерениях градиентов силы тяжести // Метрология в гравиметрии. 1984. С. 12–13.

*Юзефович А.П., Огородова Л. В.* Гравиметрия. М.: Недра. 1980.

*Boulangier Yu.D. et al.* Determination of gravitational acceleration at Moscow (ledovo), Murmansk, Odessa and Nakhodka. Bureau gravimetric international, Bulletin d'information. 1974. P. 1.25–1.30.

*Charles K., Hipkin R.* Vertical gradient and datum height corrections to absolute gravimeter data and the effect of structured fringe residuals // Metrologia. 1995. V. 32. P. 193–200.

*Demyanov G.V. et al.* Development of the State Gravity Network in Russia. TG-SMM 2013-IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, Proceedings. 2013.

*Jiang Z. et al.* Relative Gravity Measurement Campaign during the 7th International Comparison of Absolute Gravimeters (2005) // *Metrologia*. 2009. V. 46. P. 214–226.

*Jiang Z. et al.* Relative Gravity Measurement Campaign during the 8th International Comparison of Absolute Gravimeters (2009) // *Metrologia*. 2012. V. 49. P. 95–107.

*Marson I. et al.* Absolute gravity measurements in Switzerland: Definition of a base network for geodynamic investi-

gations and for the Swiss fundamental gravity net // *Bulletin Géodésique*. 1981. V. 55. P. 203–217.

*Mäkinen J.* Gravity gradients above piers in absolute gravimetry: use remove-restore for the pier attraction. IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements TG-SMM2010. 2010.

*Müller J. et al.* A land uplift model in Fennoscandia combining GRACE and absolute gravimetry data // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2012. V. 53. P. 54–60.

*Reicheneder K.* Die lokalen Schwereverhältnisse im Geodätischen Institut Potsdam – Berlin : Vermessungstechnik. 1968.

## Results of Estimating the Absolute Gravimetric Measurements at the Ledovo Fundamental Gravity Station and on the First Order Gravimetric Network of Russia

V. N. Koneshov<sup>a, c, \*</sup>, N. V. Drobyshev<sup>a</sup>, R. A. Sermyagin<sup>b, \*\*</sup>, and E. P. Razin'kova<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia*

<sup>b</sup>*Federal Scientific and Technical Center of Geodesy, Cartography, and Spatial Data Infrastructure, Moscow, 125413 Russia*

<sup>c</sup>*A. and N. Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, 600000 Russia*

\**e-mail: slavakoneshov@hotmail.com*

\*\**e-mail: sermyagin\_ra@nsdi.rosreestr.ru*

**Abstract**—This work is aimed at estimating the long-term continuing measurements of the acceleration of gravity at the Ledovo fundamental gravity station and first order stations of the gravimetric network of Russia. The observations are carried out by absolute gravimeters beginning from the mid-1970s to the present time. It is shown that the observed value of the acceleration of gravity at the Ledovo station has a tendency to decrease during last 45 years; according to our estimates, the value decreased by 32  $\mu\text{Gal}$ . The measurements carried out at first order gravity stations in Russia after renewal of network maintenance are compared with measurements carried out in the 1980s.

**Keywords:** absolute gravimeter, gravity station, change in the acceleration of gravity, gravimetric network