

УДК 528.481; 528.482

## РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА НАБЛЮДАТЕЛЬНОМ ПУНКТЕ В ПОДМОСКОВЬЕ

© 2010 г. С.В. Бехтерев, О.С. Казанцева, А.Б. Манукин, В.И. Ребров

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Работа посвящена анализу данных трехлетних комплексных измерений наклонов и деформаций с параллельной регистрацией вариаций метеопараметров при частоте опроса 1 ч. Проведенные наблюдения подтвердили надежность, высокую чувствительность, долговременную стабильность и широкий динамический диапазон разработанной в ИФЗ РАН аппаратуры. Математическая обработка и анализ данных позволили установить связь прослеженных деформационных процессов с вариациями температуры и атмосферного давления на разных периодах, выявить структурные нарушения фундамента наблюдательного пункта, оценить характерные параметры деформационных процессов на разных временных периодах, включая сезонные вариации, которыми можно характеризовать наклоны и деформации в данном районе Подмосковья.

**Ключевые слова:** наклоны, деформации, гидростатический нивелир, метеопараметры, временной тренд, корреляционный анализ, кросс-спектральный анализ, регрессионный анализ.

### Введение

Деформационные процессы в земной коре, в элементах конструкций инженерных сооружений и зданий являются прямым следствием изменений параметров их напряженного состояния. Именно аномальное изменение напряженно-деформированного состояния объекта исследований обычно предвещает нежелательные и даже катастрофические процессы. В связи с этим создание комплексных систем наблюдений для изучения деформационных процессов становится важной задачей при решении фундаментальных и прикладных проблем геофизики.

Описание комплексного геофизического наблюдательного пункта (КГНП), созданного на территории экспериментальной базы ИФЗ РАН в пос. Долгое Ледово Московской области, и первые результаты трехлетних наблюдений на нем приведены в [Бехтерев и др., 2008]. В настоящей работе обсуждаются результаты совместного математического анализа полученных многомерных рядов измерений, целью которого были оценка параметров, характеризующих свойства приборов, входящих в состав комплекса (надежность, долговременная стабильность, диапазон и т.п.) и анализ информации о динамике деформационных процессов, происходящих в месте наблюдения.

Поскольку КГНП “Ледово” размещен в помещении на первом этаже строительного сооружения, а не в условиях глубокой штольни, то тектонические движения – далеко не единственная причина, вызывающая исследуемые деформационные процессы. Уровень шумов, обусловленных как техногенными воздействиями, так и влиянием вариаций метеопараметров, существенно превышает, например, амплитуду деформаций, вызванных лунно-солнечными приливами. Однако математический анализ связи известных воздействий с особенностями деформационных процессов позволяет подойти к

решению важной прикладной задачи – изучению развития деформационных процессов в инженерных и строительных сооружениях. Особенно актуальны такие измерения для сооружений, представляющих экологическую опасность.

Разработка методики подобных измерений, использующих вариации метеопараметров как зондирующий сигнал, и методов математического анализа получаемых результатов составляет содержание данной работы. В дальнейшем накопленный опыт позволит использовать эти результаты при создании систем деформационного контроля на ответственных объектах, к которым относятся атомные электростанции, высотные плотины, дамбы, предприятия химической промышленности, хранилища высокоактивных отходов и т.п.

Важный момент при организации деформационных наблюдений – выбор места установки датчиков. Наиболее информативными представляются участки исследуемых объектов, характеризующиеся структурными неоднородностями, скрытыми трещинами и прочими нарушениями монолитности (целостности), т.е. потенциально опасные зоны. Развитие аномальных деформационных процессов, в первую очередь, должно проявиться именно в таких зонах нарушенной сплошности. Выявление потенциально опасных зон в земной коре и в конструкциях сооружений может быть проведено по методике, также использующей в качестве зондирующего сигнала вариации метеопараметров [Бехтерев и др., 2006].

### Исходные данные

КГНП “Ледово” – это отдельное помещение в пристройке к лабораторному корпусу; площадь помещения около 13 кв. м, толщина стен 40 см. Помещение оборудовано монолитным бетонным Г-образным постаментом, связанным с фундаментом основного здания. Длинная (5.15 м) сторона постаментов примыкает к наружной стене и ориентирована по направлению север–юг, короткая (2.5 м) – по направлению восток–запад; ширина постаментов 0.74 м. Помещение слабо отапливаемое, в связи с чем температура внутри него во время наблюдений менялась от 2 до 24°C.

В состав измерительного комплекса входят следующие приборы, предназначенные для измерения наклонов и деформаций:

НМД-Ш17 и НМД-Ш30 – наклонометры маятниковые двухкоординатные штольневые с измерительной базой ~150 мм для измерения наклонов по направлениям север–юг и восток–запад;

ГН1, ГН2, ГН3 – гидростатические нивелиры с базой 4.5 м для измерения относительных вертикальных смещений измерительных станций в направлении север–юг;

ГН4 и ГН5 – гидростатические нивелиры с базой 2.25 м, входящие в состав ГН3, который имеет промежуточную измерительную станцию;

ДТ – датчик вариаций температуры;

ДА – датчик вариаций атмосферного давления.

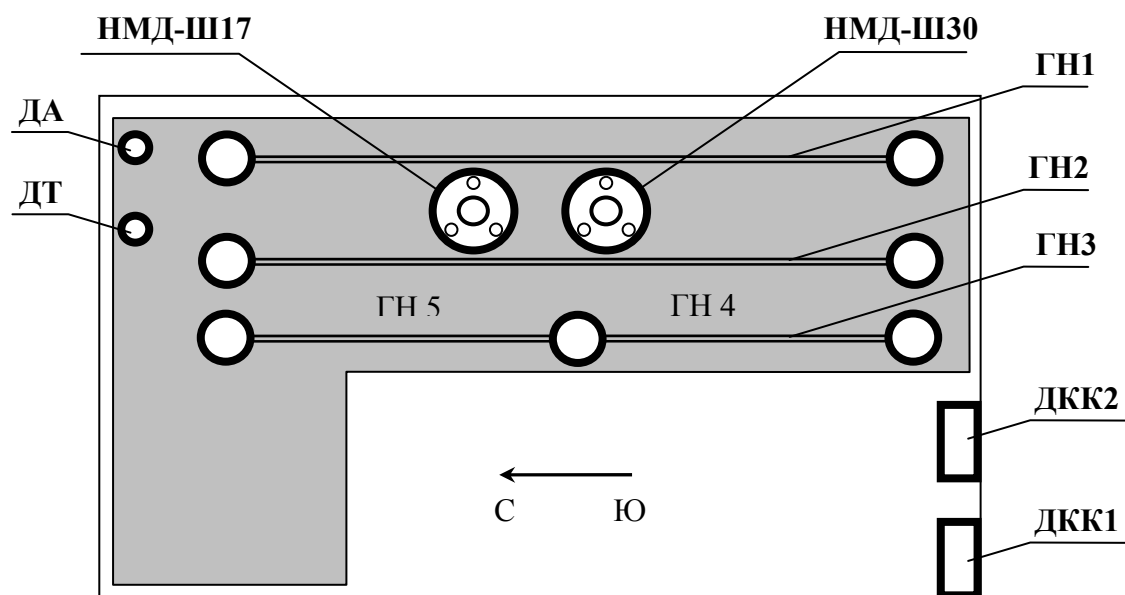
Названные датчики установлены на описанном выше бетонном постаменте.

На стене помещения в специально выбранных местах размещены два кварцевых короткобазисных деформометра ДКК с измерительной базой около 200 мм:

ДКК1 – на участке стены, включающем вертикальную трещину,

ДКК2 – на участке стены без видимых нарушений целостности.

Схема расположения датчиков в помещении КГНП “Ледово” приведена на рис. 1, технические характеристики приборов см. в статье [Бехтерев и др., 2008].



**Рис. 1.** Схема размещения датчиков на бетонном постаменте (выделен заливкой) и стене КГНП “Ледово” (вид сверху). Расшифровку аббревиатур см. в тексте

### Анализ результатов наблюдений

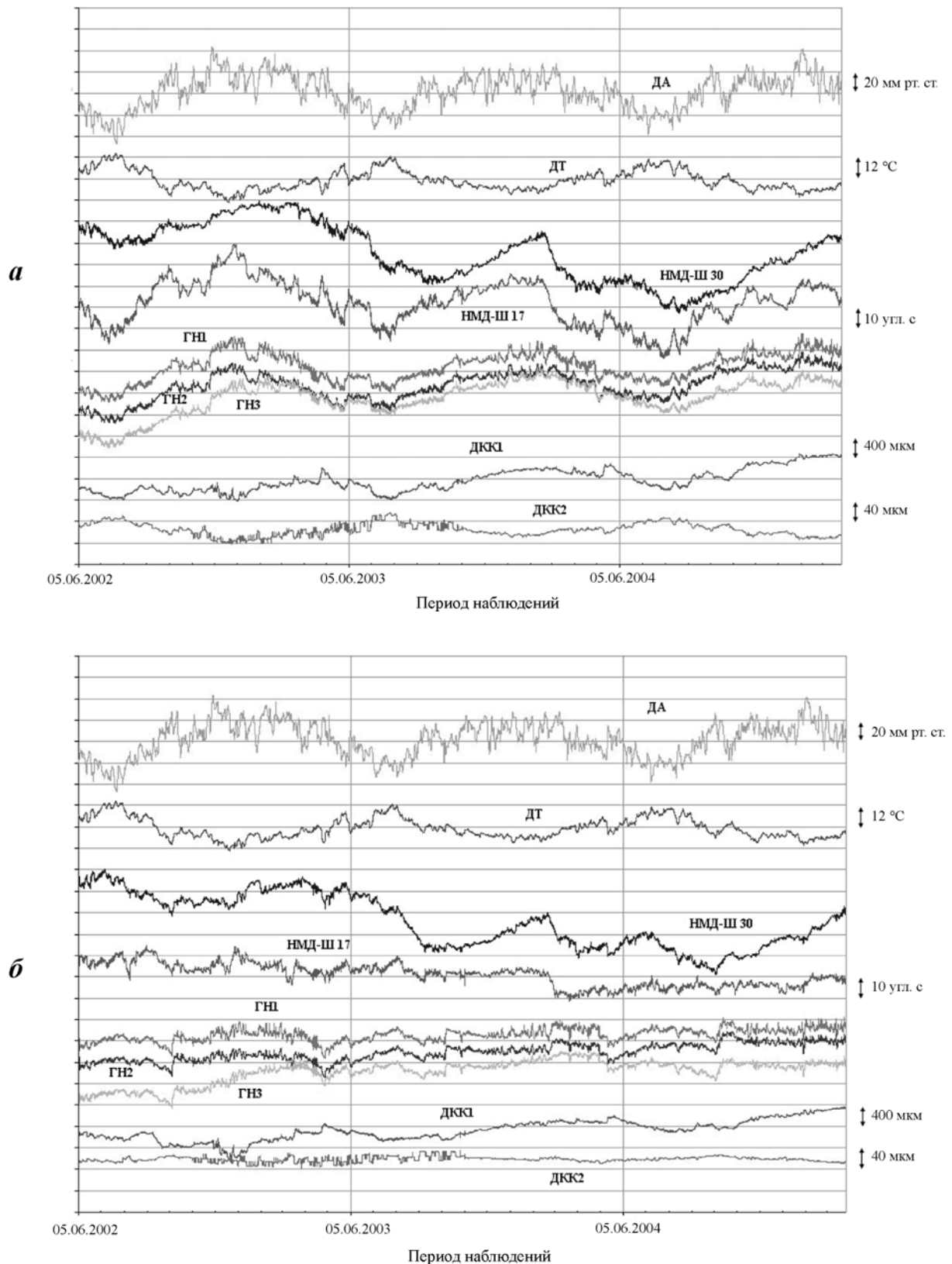
Как уже было отмечено выше, цель совместной математической обработки результатов комплексных наблюдений – выявление особенностей деформационных процессов, с помощью которых можно охарактеризовать не только сам наблюдательный пункт, включая конструкцию конкретного здания, но и район, где он расположен.

В ходе анализа результатов наблюдений были проведены: оценка влияния метеопараметров (температуры и атмосферного давления) на показания приборов, оценка долговременной стабильности аппаратуры, входящей в состав комплекса, оценка статистических характеристик измеряемых процессов.

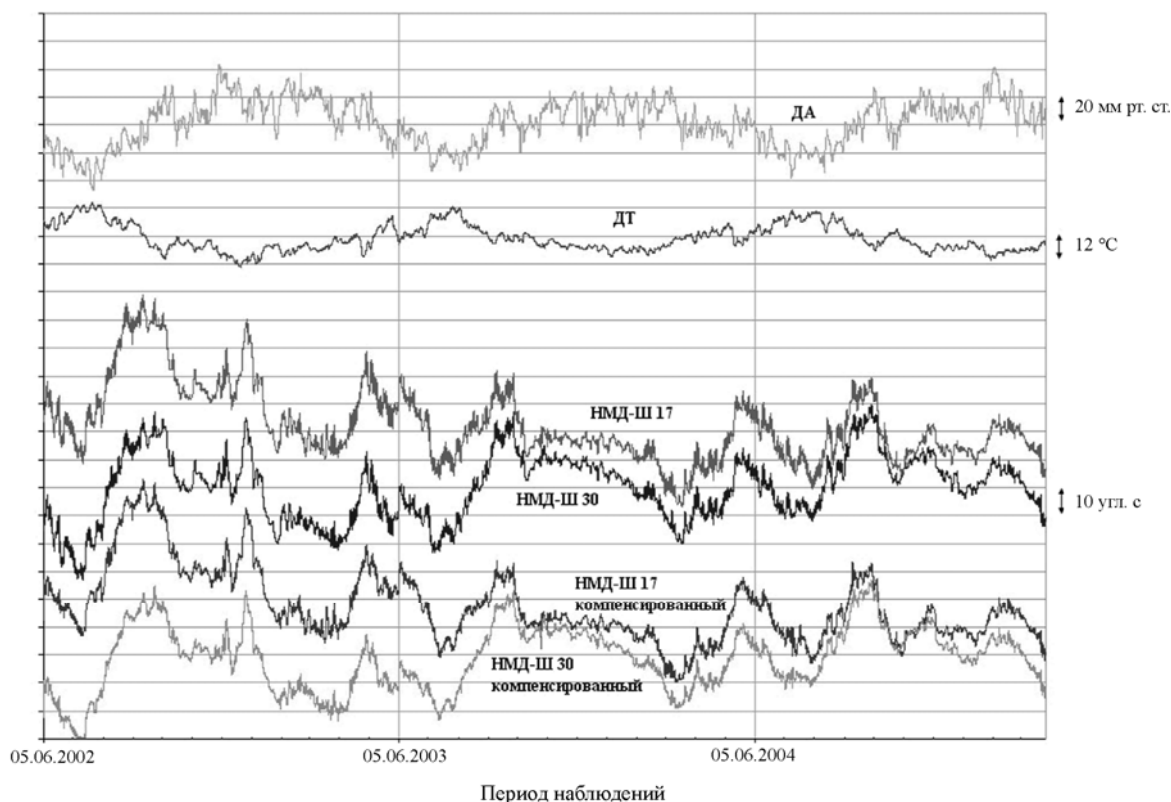
Для анализа были использованы временные ряды геофизической информации, зарегистрированной с 05.06.2002 г. по 30.03.2005 г. Каждый временной ряд содержал по 24 678 отсчетов с интервалом 1 ч. Пропуски, обусловленные небольшими перерывами в регистрации, заполнялись с применением программы *FISIM* [Любушин, 2007]. Показания кварцевых деформометров ДКК предварительно были скорректированы с учетом нелинейности их характеристик [Бехтерев, Манукин, 2006]. Затем была проведена компенсация [Любушин, 2007] влияния на исследуемые деформационные процессы внешних помех – температуры и атмосферного давления.

Графики исходных рядов показаний гидростатических нивелиров ГН1–ГН3, деформометров ДКК1, ДКК2 и наклономеров НМД-Ш в направлении север–юг вместе с записью вариаций атмосферного давления и температуры представлены на рис. 2, а. На рис. 2, б приведены графики тех же рядов после внесения компенсационных поправок, учитывающих влияние температуры и атмосферного давления, которые для краткости далее будут называться компенсированными.

Сопоставление исходных и компенсированных рядов наблюдений (рис. 2, а, б) показывает, что проведенная процедура компенсации значительно снизила шумовой фон, обусловленный вариациями метеопараметров, в основном, в низкочастотном диапазоне. Наиболее существенно уменьшились амплитуды шумовых колебаний для периодов от трех месяцев до года. Это неудивительно, поскольку на эти периоды приходятся наиболее интенсивные вариации метеопараметров, связанные с сезонными изменениями и прохождением атмосферных фронтов.



**Рис. 2.** Графики временных рядов параметров, измеряемых приборами НМД-Ш в направлении север–юг: *а* – исходные ряды; *б* – ряды после компенсации, учитывающей влияние температуры и атмосферного давления. Справа от вертикальных осей – графические масштабы измеряемых параметров; на горизонтальных осях – календарные даты, соответствующие анализируемому периоду наблюдений

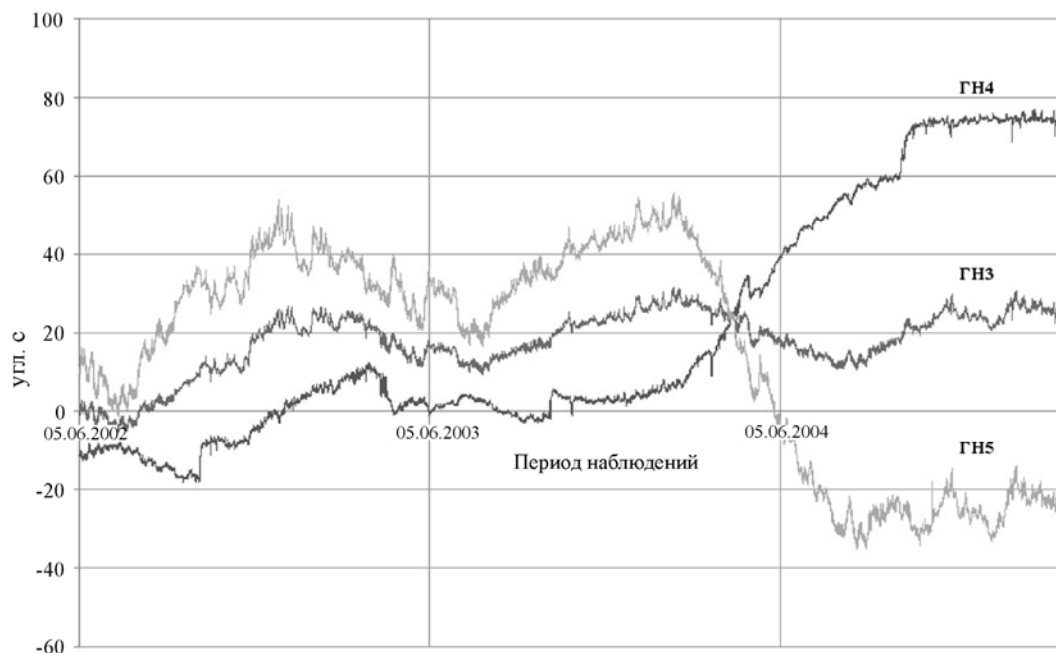


**Рис. 3.** То же, что на рис. 2 (измерения приборами НМД-Ш в направлении в направлении восток–запад). Исходные и компенсированные ряды представлены совместно

Исходные и компенсированные ряды показаний наклономеров НМД-Ш в направлении восток–запад представлены на рис. 3. Примечательно, что представленные ряды отличаются незначительно, что, по-видимому, можно объяснить особенностями конструкции всего лабораторного здания, вытянутого в этом направлении. Наклоны же здания и его фундамента в направлении север–юг из-за суточного градиента температуры существенно больше наклонов в направлении восток–запад.

Наличие промежуточной измерительной станции у гидростатического нивелира ГН3 позволило при анализе графиков временных рядов, зарегистрированных гидростатическими нивелирами ГН3, ГН4 и ГН5 (см. рис. 1), выявить тонкую пространственную особенность деформационного процесса – нарушение целостной структуры постамента. Исходные графики временных рядов наклонов, зарегистрированных этими нивелирами, представлены на рис. 4. Здесь уместно напомнить, что гидростатический нивелир измеряет разность вертикальных относительных перемещений измерительных станций, которую после деления ее на расстояние между станциями называют обычно эффективным наклоном базы.

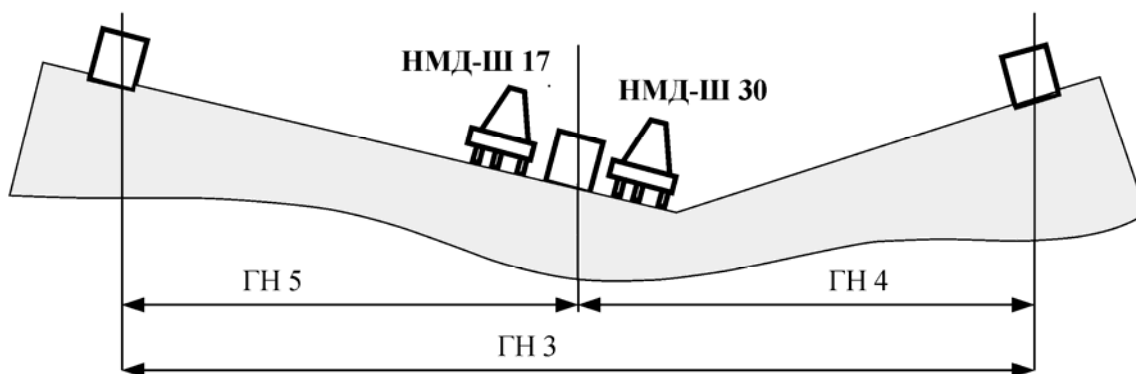
На графиках, приведенных на рис. 4, видно, что с февраля по октябрь 2004 г. происходило существенное изменение эффективных наклонов, зарегистрированных ГН4 и ГН5. При этом изменение наклона, зарегистрированное ГН4, составило около 70 угл. с; прибор ГН5 зарегистрировал близкое по величине изменение наклона, но в противоположную сторону. Поскольку показания ГН3 представляют суммарный наклон, регистрируемый ГН4 и ГН5, то эти изменения практически не отразились на его показаниях. Учитывая схему соединения нивелиров, можно сделать вывод, что в течение указанного интервала времени произошло “проседание” центральной части постамента примерно на 0.40 мм по отношению к краям. При этом с февраля по апрель 2004 г. отмечено также резкое изменение показаний наклономеров НМД-Ш в направлении север–юг: оба



**Рис. 4.** Графики исходных временных рядов углов наклона, измеренных приборами ГН 3, ГН 4, ГН 5

прибора показали изменение наклона постамента примерно на 25 угл. с. Поскольку эти наклонометры установлены на расстоянии около 0.3 м друг от друга по обеим сторонам от поперечной оси постамента и их наклон произошел в одном направлении, можно предположить, что деформация фундамента была несимметричной.

Прослеженная деформация постамента, на котором были размещены датчики, схематично изображена на рис. 5. Для выявления причин установленной деформации постамента, развивавшейся в течение почти 7 месяцев, требуются дополнительные исследования.



**Рис. 5.** Схематичное изображение деформации фундамента

### Описание методов статистической обработки

Анализ полученных в ходе трехлетних наблюдений данных комплексных геофизических измерений потребовал применения различных статистических методов математической обработки, которые последовательно рассматриваются далее.

## Оценка долговременной стабильности датчиков

Для оценки долговременной стабильности датчиков были определены значения коэффициентов уравнения линейного тренда всех приборов. Коэффициенты определялись отдельно для исходных и компенсированных рядов (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты уравнения линейного тренда

Датчик	Размерность	Для исходного ряда	Для компенсированного от влияния температуры и давления ряда
ГН1	угл. с/сут	0.0089	0.00575
ГН2	угл. с/сут	0.0139	0.0108
ГН3	угл. с/сут	0.0167	0.0138
ГН4	угл. с/сут	0.0932	0.0933
ГН5	угл. с/сут	-0.06	-0.0657
НМД-Ш17(С-Ю)	угл. с/сут	-0.0088	-0.01412
НМД-Ш17(В-З)	угл. с/сут	-0.0251	-0.0263
НМД-Ш30(С-Ю)	угл. с/сут	-0.0298	-0.0335
НМД-Ш30(В-З)	угл. с/сут	0.01006	0.0078
ДКК1	мкм/сут	0.577	0.5303
ДКК2	мкм/сут	-0.0041	0.002

Данные, приведенные в табл. 1, демонстрируют некоторые различия между значениями коэффициентов тренда для исходных и компенсированных рядов. Достаточно близкие по величине значения для нивелиров ГН1, ГН2, ГН3 (некоторое увеличение тренда от ГН1 к ГН3 объясняется особенностями конструкции здания и постамента) позволяют сделать предположение, что тренд обусловлен не изменением параметров датчиков, а наклоном самого постамента со скоростью около 0.01 угл. с/сут. Верхняя оценка величины дрейфа для этих приборов по результатам анализа линейной части дрейфа для трех гидростатических нивелиров ГН1, ГН2, ГН3 составила ~0.004 угл. с/сут или ~0.12 угл. с/мес. Это достаточно хороший результат для приборов при их поверхностной установке. Существенно худший результат дает оценка дрейфа по расходимости показаний “точечных” приборов – наклономеров НМД-Ш (база менее 200 м). Величины оценки дрейфа для компоненты восток–запад составляют около 0.025 угл. с/сут, а для компоненты север–юг – примерно 0.015 угл. с/сут. Тем не менее, можно сказать, что используемые датчики характеризуются достаточно высокой долговременной стабильностью. Разный знак коэффициента тренда для нивелиров ГН4 и ГН5 объясняется характером деформационных процессов в постаменте (см. рис. 5).

Высокое значение коэффициента линейного тренда для деформометра ДКК1 связано с постоянным увеличением трещины в стене, на которой он размещен. За трехлетний период наблюдения трещина увеличилась на ~0.593 мм. Оценка же дрейфа деформометра, выполненная для датчика ДКК2, размещенного на ненарушенном участке стены, позволяет утверждать, что он не превышает  $2 \cdot 10^{-8}$  отн. ед./сут.

## Дисперсионный анализ

Для оценки влияния метеопараметров на показания датчиков был проведен сравнительный анализ дисперсий исходных временных рядов  $D_x$  и компенсированных  $D_t$  (от температуры) и  $D_{tp}$  (от температуры и атмосферного давления) по всей выборке (табл. 2).

**Таблица 2.** Дисперсии временных рядов

Датчики	$D_x$	$D_t$	$D_{tp}$	$D_x/D_t$	$D_x/D_{tp}$
ГН1	43.965	8.9035	8.8262	4.938	4.981
ГН2	48.946	15.238	15.172	3.212	3.226
ГН3	63.746	30.688	30.421	2.077	2.095
ГН4	931.65	930.08	929.77	1.002	1.002
ГН5	756.72	696.41	697.26	1.087	1.085
НМД-Ш 17(С-Ю)	108.91	27.665	27.495	3.937	3.961
НМД-Ш 17(В-3)	184.34	180.71	180.71	1.020	1.020
НМД-Ш 30(С-Ю)	179.24	154.15	153.88	1.163	1.165
НМД-Ш 30(В-3)	136.56	113.14	113.13	1.207	1.207
ДКК1	46964.4	36833.8	36810.3	1.275	1.276
ДКК2	139.51	24.316	24.342	5.737	5.731

Результаты дисперсионного анализа показывают, что наибольшее влияние на показания датчиков и исследуемые процессы оказывает температура; влияние атмосферного давления существенно меньше.

Влияние температуры на показания гидростатических нивелиров ГН1, 2, 3 падает по мере увеличения расстояния между прибором и наружной стеной. Этот эффект трудно объяснить сложными температурными деформациями фундамента и связан, вероятнее всего, с вариациями градиента температуры вдоль оси гидростатических нивелиров, которые уменьшаются по мере удаления от наружной стены. Влияние температуры на показания нивелиров ГН4 и ГН5, как следует из табл. 2, незначительно по сравнению с влиянием деформации самого постаментов.

Механизм воздействия метеопараметров на показания наклономеров НМД-Ш может быть гораздо сложнее и обусловлен тем, что это “точечные” приборы. Их показания связаны с локальными особенностями места установки и могут быть вызваны наличием инородного “включения” под одной из опор прибора. При базе прибора 150 мм вертикальное перемещение одной из опор на  $\Delta h = 1$  мкм вызовет наклон примерно на 1 угл. с.

Объяснение поведения кварцевых деформометров ДКК1 и ДКК2 состоит в том, что ДКК2 установлен на ненарушенном участке стены, деформации на котором целиком определяются тепловыми деформациями материала стены. ДКК1 установлен вблизи трещины, поэтому фиксируемые им процессы связаны с деформациями самой трещины, которые на порядок больше тепловых деформаций, измеряемых ДКК2. Прямое влияние эффектов теплового расширения на фоне процессов “вариаций размеров трещины” пренебрежимо мало.

#### Корреляционный анализ

В табл. 3 приведены значения коэффициентов корреляции показаний каждого из датчиков с температурой ( $R_t$ ), а в табл. 4 – значения коэффициентов парной корреляции показаний соответствующих датчиков для исходных и компенсированных рядов ( $R$ ).

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции показаний датчиков с температурой

Датчик	$R_t$	Датчик	$R_t$
ГН1	-0.8912	НМД-Ш30 (С-Ю)	-0.3836
ГН2	-0.8303	НМД-Ш17 (В-3)	-0.1355
ГН3	-0.7244	НМД-Ш30 (В-3)	-0.4177
ГН4	-0.1182	ДКК1	-0.4704
ГН5	-0.2894	ДКК2	0.9082
НМД-Ш17 (С-Ю)	-0.8629		



Таблица 4. Коэффициенты парной корреляции

Датчики	R	
	Для исходных рядов	Для компенсированных рядов
ГН1 – ГН2	0.9683	0.9045
ГН2 – ГН3	0.8865	0.7439
ГН1 – ГН3	0.8576	0.6806
ГН4 – ГН5	–0.8535	–0.9342
НМД-Ш17 – НМД-Ш30 (С-Ю)	0.6949	0.7827
НМД-Ш17 – НМД-Ш30 (В-З)	0.5295	0.5223
ДКК1 – ДКК2	–0.4630	–0.0923

Приведенные в табл. 3 и 4 результаты корреляционного анализа позволяют сделать следующие выводы.

Коэффициенты корреляции показаний гидростатических нивелиров ГН1, ГН2, ГН3 с температурой и между собой высоки, однако, более низкий коэффициент корреляции для пар ГН2 – ГН3 и ГН1 – ГН3 по сравнению с парой ГН1 – ГН2 может свидетельствовать о том, что выявленное нарушение целостности постаumenta выражено сильнее на его более удаленном от наружной стены участке. Коэффициент парной корреляции ГН4 – ГН5 высок, однако отрицательный знак коэффициента  $R$  подтверждает, что деформация левой и правой половины фундамента происходит в противофазе.

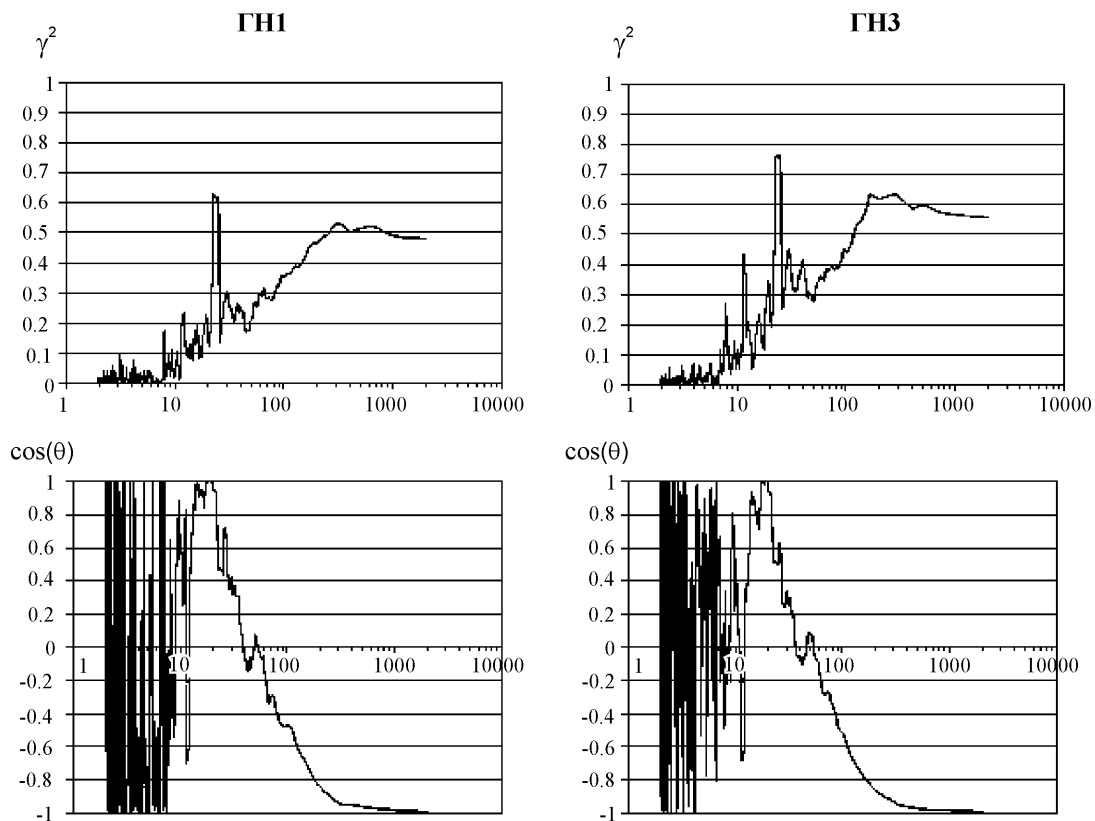
Совместный анализ наклонов, измеренных с помощью НМД-Ш по направлениям север–юг и восток–запад, показал, что хотя они изменяются синфазно, коэффициент корреляции для направления восток–запад не столь высок (0.52).

Показания деформометра ДКК2, установленного на ненарушенной стене, как уже отмечалось, прямо пропорциональны вариациям температуры. В то же время, показания деформометра ДКК1 обратно пропорциональны изменению температуры, т.е. при увеличении температуры трещина уменьшается, что обусловлено, очевидно, конструктивными особенностями строения и проявлением, например, эффекта “рычага”.

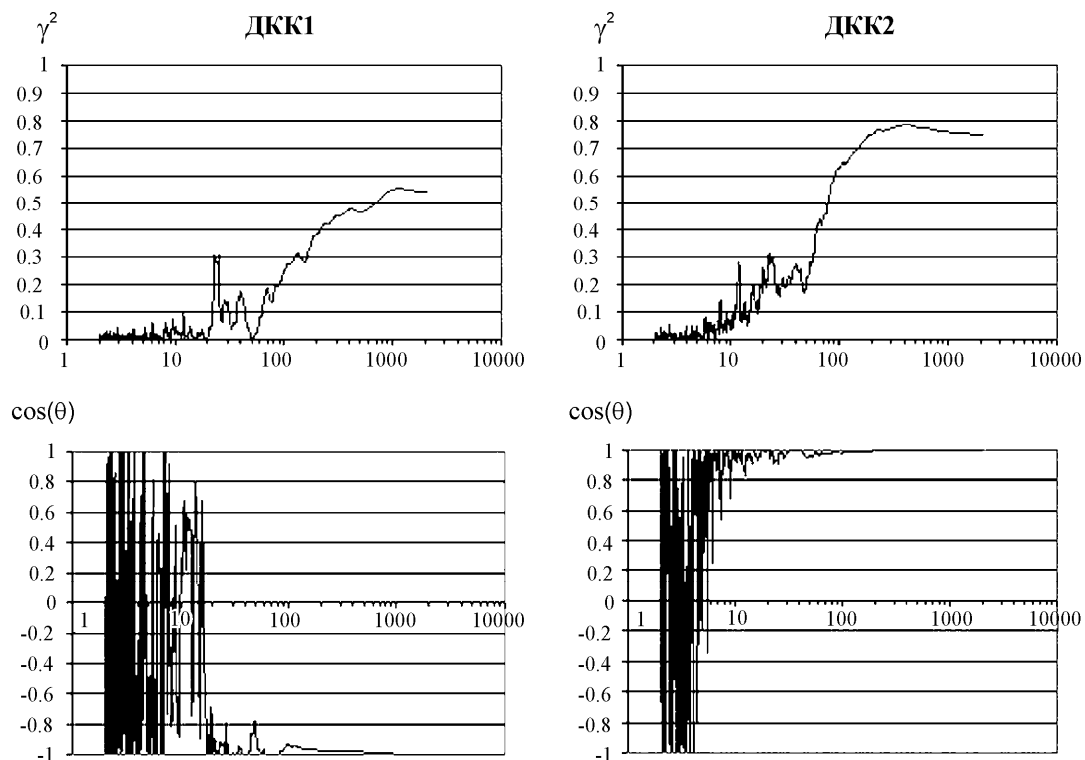
#### Кросс-спектральный анализ

Чтобы оценить влияние температуры на показания датчиков на различных частотах, производились вычисления непараметрической оценки квадрата модуля спектра когерентности ( $\gamma^2$ ) и косинуса разности фаз ( $\cos\theta$ ) для пар временных рядов “температура – показания датчика”. Квадрат модуля спектра когерентности дает оценку обусловленной влиянием температуры части (доли) от общей «энергии» измеряемого параметра (в данном случае наклона или деформации) на анализируемой частоте (периоде). На рис. 6 представлены результаты вычислений для гидростатических нивелиров ГН1 и ГН3, на рис. 7 – для двух деформометров ДКК1 и ДКК2, на рис. 8 – для наклономеров НМД-Ш. На приведенных рисунках видно, что для всех исследуемых приборов наибольшее влияние температуры проявляется на периодах, близких к 24 ч, а также 8 и 12 ч.

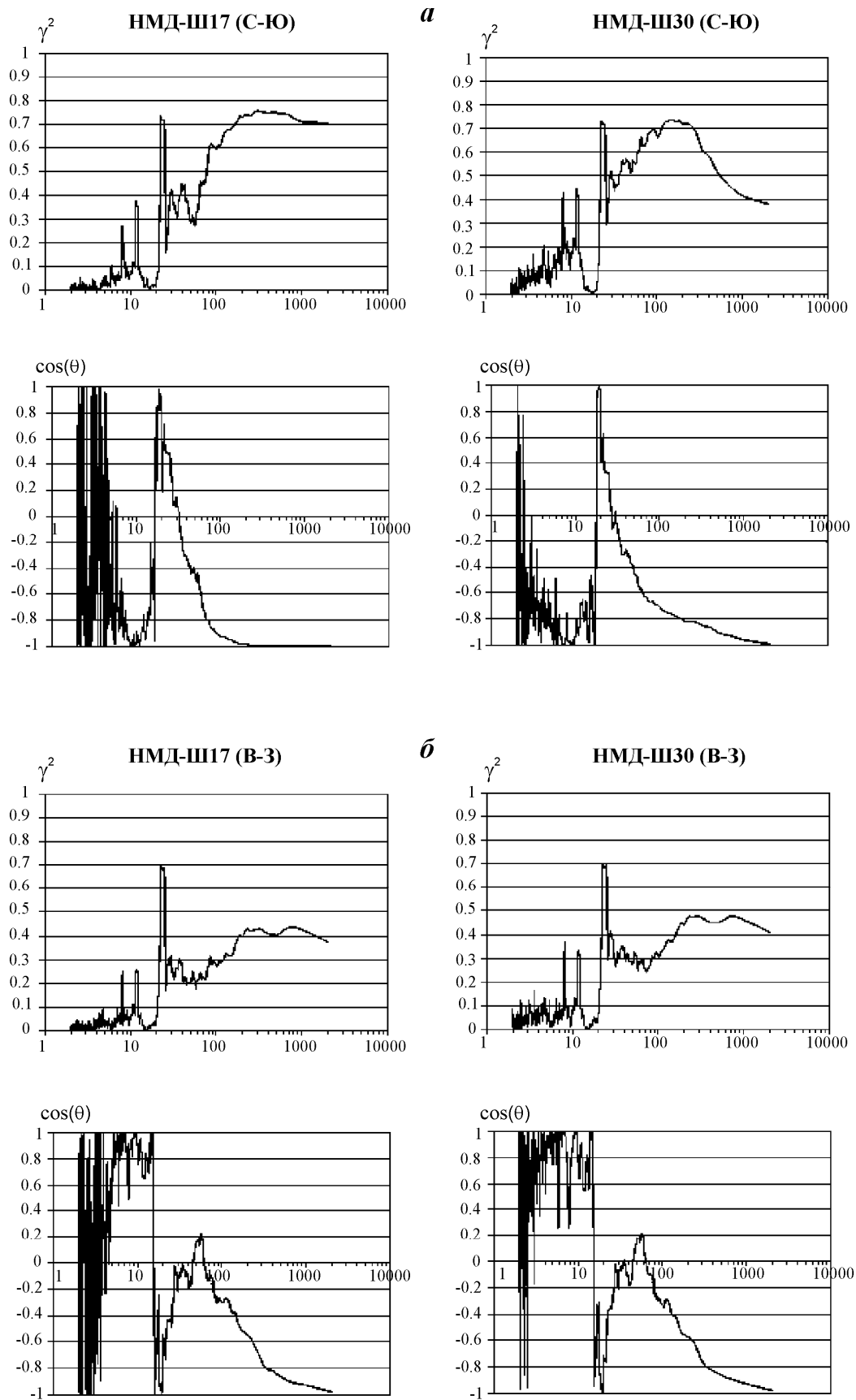
Анализируя результаты, полученные для наклонов (см. рис. 6, 7), необходимо отметить условность знака  $\cos\theta$ , характеризующего синфазность поведения двух процессов при измерении. Общая закономерность, выявленная по графикам, приведенным на рис. 6 и 7, проявляется в повышении  $\gamma^2$  с ростом периодов и в изменении знака  $\cos\theta$  (начиная с периодов ~250–300 ч, соответствующих 10–15 суткам, значение  $\cos\theta$  приближается к –1, т.е. изменение температуры и вариации наклонов происходят в противофазе). Это же подтверждается графиками исходных временных рядов (см. рис. 2, а).



**Рис. 6.** Квадрат модуля спектра когерентности  $\gamma^2$  и косинус разности фаз  $\cos\theta$  для пар временных рядов: температура – показания гидростатических нивелиров ГН1 и ГН3



**Рис. 7.** Квадрат модуля спектра когерентности  $\gamma^2$  и косинус разности фаз  $\cos\theta$  для пар временных рядов: температура – показания кварцевых деформометров ДКК1 и ДКК2



**Рис. 8.** Квадрат модуля спектра когерентности  $\gamma^2$  и косинус разности фаз  $\cos\theta$  для пар временных рядов: температура – показания наклономеров НМД-Ш: *а* – в направлении север–юг, *б* – в направлении восток–запад

Объяснение этого эффекта, по-видимому, связано с тем, что наряду с температурой на наклоны фундамента оказывают влияние множество других факторов, среди которых как главные отметим: метеосадки, вызывающие изменение нагрузки на грунт; изменение влажности почвы, приводящее к изменению ее механических характеристик; сезонные изменения прочностных свойств грунта (промерзание, оттаивание и т.п.). На коротких периодах (до 24 ч) изменение этих факторов незначительно, поэтому основное влияние на измеряемые наклоны оказывают вариации температуры. На больших (от 15 сут и более) периодах, включая сезонные, именно перечисленные выше факторы начинают воздействовать на результаты измерений так, что повышение температуры вызывает “наклон” в противоположном направлении. Это относится к измерениям приборов, ориентированных в обоих направлениях – север–юг, восток–запад (см. рис. 8).

Для выявления механизма “аномального” влияния температуры требуются, очевидно, измерения дополнительных параметров, таких как количество осадков, вариации уровня грунтовых вод и пр.

Результаты анализа данных о линейных деформациях, полученных датчиком ДКК2, установленным на ненарушенном участке стены (см. рис. 7), оказались ожидаемыми. Действительно, основным фактором этих деформаций являются термодформации исследуемой базы деформометра, вследствие которых на всех периодах наблюдается синфазность, т.е.  $\cos\theta$  близок к 1. Рост  $\gamma^2$  на больших периодах связан с увеличением амплитуды вариаций температуры на них. Что касается анализа результатов измерений параметров деформации участка стены, на котором имеется видимая трещина, то и в этом случае влияние вариаций температуры на ход деформационных процессов является определяющим. Изменения наблюдаемых деформаций в противофазе с вариациями температуры ( $\cos\theta \approx -1$ ) можно объяснить тем, что к изменению ширины раскрытия трещины приводит температурное расширение элементов конструкции здания через систему своеобразных “рычагов”, которые уже упоминались выше.

### Регрессионный анализ

Дисперсионный анализ показал, что влияние вариаций атмосферного давления на деформационные процессы существенно меньше влияния вариаций температуры. Для ответа на вопрос, можно ли вообще пренебречь влиянием вариаций давления, был выполнен регрессионный анализ, цель которого – определение параметров регрессионной модели, связывающей показания датчиков деформаций и наклонов с метеовариациями и оценка значимости параметров модели. В ходе анализа оценивается влияние температуры и атмосферного давления на деформационные процессы.

Принята линейная модель регрессии:

$$y = K_0 + K_1 T + K_2 A,$$

где  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  – коэффициенты модели, подлежащие оценке;  $T$  – температура;  $A$  – атмосферное давление.

Для оценки значимости параметров модели используем критерий Стьюдента, а для оценки адекватности модели исследуемым деформационным процессам – критерий Фишера. Анализ проведен для исходных рядов.

Результаты выполненного анализа представлены в табл. 5, где приведены значения множественного коэффициента корреляции  $R$ , среднеквадратического отклонения остатка  $\sigma$ ; критерия Стьюдента  $t$  для коэффициентов уравнения регрессии  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  и критерия Фишера  $F$ .

Таблица 5. Расчетные значения  $t$ - и  $F$ -критерия

Датчики	$R$	$\sigma$	$ t $ для			$F$
			$K_0$	$K_1$	$K_2$	
ГН1	0.89221	2.99468	-102.53	-125.58	14.4673	48187.7
ГН2	0.8311	3.89083	-70.421	-95.697	10.1844	27576.3
ГН3	0.72743	5.47874	-27.061	-60.555	15.15	13876.3
ГН4	0.12423	30.2877	-5.8339	-2.9281	6.07076	193.527
ГН5	0.28945	26.3321	-4.566	-21.818	-0.6627	1129.02
НМД-Ш17(С-Ю)	0.14045	13.4433	-6.162	-14.866	-5.8794	248.47
НМД-Ш17(В-З)	0.86378	5.25858	-69.221	-130.96	-11.999	36286.7
НМД-Ш30(С-Ю)	0.41829	10.6149	-11.967	-28.882	3.80063	2618.48
НМД-Ш 30(В-З)	0.38607	12.3505	-9.4749	-35.877	-7.4757	2162.67
ДКК1	0.47269	190.982	-12.877	-30.101	8.24003	3552.43
ДКК2	0.90828	4.94166	-1.8962	152.449	0.05712	58194.6

Значение  $t$ -критерия определялось как отношение значения коэффициента к его стандартной ошибке. Следовательно, если расчетное значение  $|t|$  превышает табличное, коэффициент считается значимым (табличное значение  $t$ -критерия равно 1.96 для уровня достоверности  $\alpha=0.05$  и 2.576 для  $\alpha=0.1$ ; табличное значение  $F$ -критерия равно 19.5 для  $\alpha=0.05$  и 99.5 для  $\alpha=0.1$ ).

Значение  $F$ -критерия определялось отношением дисперсии регрессии к дисперсии остатка. Если значение  $F$ -критерия превышает табличное для соответствующих степеней свободы, то можно говорить об адекватности модели исследуемому процессу.

Анализ табл. 5 показывает, что модели, включающие и температуру, и атмосферное давление, адекватны деформационным процессам. В то же время коэффициенты модели, учитывающие влияние давления на показания ДКК2 (на ненарушенной стене) и ГН5, незначимы.

Значительно меньшее значение  $t$ -критерия для коэффициентов  $K_2$ , учитывающих влияние давления, свидетельствует о существенно меньшем по сравнению с температурой влиянии атмосферного давления на исследуемые процессы, однако, включение его в регрессионную модель правомерно.

### Выводы

Проведение длительных измерений на комплексном геофизическом наблюдательном пункте “Ледово”, математическая обработка и анализ полученных результатов наблюдений позволили сделать следующие выводы.

1. Подтверждена работоспособность, надежность, высокая точность и долговременная стабильность аппаратуры, используемой для деформационных измерений и измерений вариаций метеопараметров.

2. По результатам длительных (трехлетних) измерений по сходимости показаний приборов установлена верхняя граница их собственного дрейфа. Для гидростатических нивелиров ГН дрейф не превышает  $10^{-2}$  угл. с/мес, для наклономеров НМД-Ш –  $10^{-1}$  угл. с/мес. Для деформометра ДКК2 он не превышает  $6 \cdot 10^{-7}$  отн. ед./мес.

3. Определены основные спектральные составляющие деформационных процессов и амплитуды их сезонных вариаций. Эти величины, по-видимому, можно считать мажорирующими при оценке деформационных процессов в районе наблюдательного пункта “Ледово”.

4. Выявлена сложная аномальная деформация постамента, связанная с нарушением его сплошности. Это было сделано по результатам анализа измерений гидростатическим нивелиром ГНЗ, включающим промежуточную измерительную станцию в середине линейной базы прибора.

5. Проведенный подробный статистический анализ результатов длительных измерений позволил выявить и получить численные значения, характеризующие сложную связь измеряемых параметров деформационных процессов с вариациями температуры и атмосферного давления и их зависимость от диапазона временных периодов, на которых вычисляются корреляционные параметры. Результатом анализа стало также понимание необходимости проведения в дальнейшем измерений дополнительных параметров, оказывающих существенное влияние на ход деформационных процессов на больших периодах. В первую очередь, речь идет о вариациях уровня подземных вод и количестве метеосадков.

Накопленный в ходе проводимых комплексных деформационных измерений опыт, связанный с методикой наблюдений и анализом получаемых данных, безусловно, может быть в дальнейшем использован для исследований аномальных деформационных процессов на объектах, в том числе экологически опасных, с целью предупреждения о возможных событиях катастрофического характера природного и техногенного происхождения.

### Литература

- Бехтерев С.В., Вольфсон Г.Б., Калинин И.И., Манукин А.Б.* Метод выявления потенциально опасных зон на инженерных объектах и в земной коре // Сб. докл. 4-й Всероссийской научной конференции “Управление и информационные технологии”, 10–12 октября 2006 г. СПб., 2006. С.250–256.
- Бехтерев С.В., Манукин А.Б.* Учет нелинейности характеристик емкостных частотных преобразователей на примере кварцевых деформометров // Сейсм. приборы. 2006. Вып. 42. С.14–22.
- Бехтерев С.В., Казанцева О.С., Манукин А.Б., Ребров В.И., Сиводедова Н.Г.* Комплексный геофизический, наблюдательный пункт: результаты многолетних наблюдений // Сейсм. приборы. 2008. Т. 44, № 2. С.50–58.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.

#### *Сведения об авторах*

**БЕХТЕРЕВ Сергей Вадимович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. E-mail: calm@tula.net

**КАЗАНЦЕВА Ольга Сергеевна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: +7 (495)254-23-50. E-mail: ok800@ifz.ru

**МАНУКИН Анатолий Борисович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, профессор, ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, тел.: +7 (495) 254-23-50. E-mail: amanukin@yandex.ru

**РЕБРОВ Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: +7 (495) 526-93-36. E-mail: virebrov@yandex.ru

## DEFORMATION MEASUREMENTS ON THE OBSERVATION POST IN MOSCOW REGION

S.V. Bekhterev, O.S. Kazantseva, A.B. Manukin, V.I. Rebrov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The paper is devoted to the analysis of data of the three-year period of complex measurements of inclinations and deformations with simultaneous registration of variations of meteoparameters with measuring frequency 1/h. Long-period measurements confirmed reliability, high sensitivity, long-term stability and a wide dynamic range of the equipment developed in IPE the Russian Academy of Sciences. Mathematical processing and analysis of the data showed relations of the measured deformational processes with variations of temperature and atmospheric pressure at different time-scales, revealed structural infringements of the pillar, provided characteristic parameters of deformation processes at different time periods, including seasonal variations. It permits to characterize inclinations and deformations in the given area of Moscow region.

**Keywords:** inclinations, deformations, hydrostatic level, meteoparameters, time trends, correlation analysis, cross -spectral analysis, regression analysis.