

с 345е

+

5050/81

Васютинский И.И.
и др.



Б1-9-81-535.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-81-535.

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

• Дубна 1981

Объединенный институт ядерных исследований

Лаборатория высоких энергий

И.Ю.Васютинский^{*}, В.П.Вихрев^{**}, В.А.Горелов^{**}, Л.П.Зиновьев,
И.Б.Иссинский, И.И.Карпов, Е.М.Кулакова, Л.Г.Макаров, В.Е.Новак^{*},
В.Н.Перфеев, И.Н.Семенюшкин, Ю.В.Смирнов, А.Н.Соловьев^{**},
Ю.Е.Федосеев^{*}, В.И.Черников, Х.К.Ямбаев^{*}

51 - 9 - 81 - 535

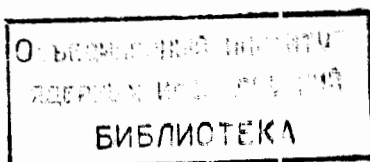
К вопросу о высотном положении магнита синхрофазотрона
ЛВЭ ОИЯИ.

Получено поступило
в издательский отдел
03.08.1981

Дубна, 1979 год

* Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, г.Москва.

** Государственный союзный проектный институт, г.Москва.



И. Ю. Васютинский и др.

К вопросу о высотном положении электромагнита синхрофазотрона ОИЯИ.

Приводятся методика высокоточных геодезических измерений высотного положения электромагнита синхрофазотрона ОИЯИ, полученные результаты измерений и их анализ.

Цель работы – получение информации о динамике высотных перемещений электромагнита синхрофазотрона и сооружений ускорительного комплекса.

В результате исследований получена статистическая информация о динамике высотных перемещений электромагнита ускорителя и сооружений за период 1973–1976 г.г.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий,
Дубна, 1979 г.

TO THE QUESTION ON A HIGH-ALTITUDE POSITION OF THE ELECTROMAGNET
OF THE DUBNA SYNCHROPHASOTRON

Information is presented on the methodics of highly precise geodetic measurements of a high-altitude position of the electromagnet of the Dubna synchrophasotron as well as the obtained data of measurements and their analysis.

The aim of this work is to get information on the dynamics of high-altitude shifts of the electromagnet of the synchrophasotron and its buildings.

As a result of the studies on the dynamics of high-altitude shifts of the electromagnet of the synchrophasotron and of its buildings, statistic information has been obtained.

The investigation has been performed at the High Energy Laboratory, JINR.

Введение.

Работа ускорителя определяется многими параметрами установки, в том числе и точностью установки электромагнита /ЭМ/ ускорителя /У/. Дубненский синхрофазотрон /СФТ/ на энергию 10 ГэВ работает с 1957 года, но характеристики ЭМ СФТ, в частности его деформации значительно отличаются от проектных /1, 2, 3, 4, 5/.

В связи с реализацией на СФТ программы повышения интенсивности ускоряемого пучка с введением нового инжектора ЛУ-20 в работу возникла необходимость в проведении подробной съемки действительного положения центра зазора магнита ускорителя. В 1972 году был проведен анализ деформаций ЭМ СФТ и определен реальный профиль нижнего полюса ЭМ ускорителя. К этому времени осадки ЭМ СФТ увеличились по сравнению с 1956 годом, а деформация фундамента достигла 25-28 мм./6/.

Согласно работе /3/ это объясняется тем, что фактическая нагрузка физического оборудования на грунт составила 2.6 кг/см^2 , что примерно на 30 % больше, чем расчетная 2.0 кг/см^2 . Возникшие осадки имеют неравномерный характер (в виде волнообразной кривой) и наблюдаются как в радиальном, так и в аксиальном направлениях по кольцу ускорителя. В этой работе отмечено, что наружные края квадрантов (К) СФТ опущены больше, чем внутренние, и эта разница достигает по разным измерениям от 1.5 до 5 мм /6/. Согласно требованиям проекта допуск на разность высотного положения КУ ЭМ должен был составлять $\pm 2 \text{ мм}$ /2/.

Влияние деформаций ЭМ на бетатронные колебания заряженных

частиц (ЗЧ) в СФТ подробно рассмотрено в работе /7/. Авторами этой работы показано, что именно деформации квадрантов ускорителя можно считать одной из причин развития нежелательных резонансов связи бетатронных колебаний, приводящих к потерям пучка на вертикальных стенках камеры ускорителя, а, значит, в конечном счете и интенсивности СФТ (что наблюдалось на ускорителе в течение длительного времени), хотя апертура вакуумной камеры 2000x400 мм и ток инжекции давали основание для получения пучков большей интенсивности.

Деформации КУ приводят к уменьшению вертикальной апертуры и могут быть скомпенсированы с помощью коррекций магнитного поля СФТ, однако неконтролируемое изменение деформаций ЭМ ускорителя во времени изменяет характер и величину потерь пучка, что в свою очередь требует трудоемких операций перестройки режима систем коррекции МП ускорителя.

При сооружении синхрофазотрона не были предусмотрены постоянные юстировочные устройства для регулировки высотного положения кольцевого ЭМ, как это было сделано на Бэватроне /4/, и это обстоятельство не позволяет производить его юстировку во время остановок. Но поскольку ускоритель заряженных частиц, как известно, является прецизионным сооружением, то он требует систематического наблюдения за деформациями несущих строительных конструкций и осадок фундаментов под ними. Такие наблюдения возможно осуществить с помощью методов и приборов высокоточной прикладной геодезии, которая позволяет выполнять такие измерения, в том числе и высотные, до десятых и сотых долей миллиметра /8/.

Учитывая вышеизложенную ситуацию на ускорителе, было решено

вновь организовать систематические геодезические измерения высотного положения ЭМ СФТ (прерванные в 1956 году, когда был сделан вывод о том, что установилось равновесие и прекратились деформации основания ЭМ ускорителя и фундамента) с целью выяснения причин дальнейших деформаций, произошедших за период 1956-1972 г.г. и определения действительного положения медианной поверхности ускорителя.

Для контроля высотного положения медианной поверхности ускорителя необходимо определить отметки характерных точек нижних полюсов магнита СФТ и измерить с большой точностью соответствующий им зазор между кромками полюсов, образованный не плоскопараллельными поверхностями, а которые имеют между собой расходящийся от центра ускорителя угол величиной 9.3×10^{-3} рад. Измерить зазор с такой точностью известными методами и существующими приборами, применяемыми в геодезии и машиностроении, оказалось невозможным, так как при конструировании вакуумной камеры СФТ не была предусмотрена возможность таких высокоточных измерений.

С целью решения поставленных выше задач в 1973 году была разработана и предложена методика высокоточных геодезических измерений, которая предусматривала перенесение части этих измерений внутрь вакуумной камеры ускорителя. Выполнение работ по этой методике /9/ потребовало создания ряда нестандартных геодезических приборов : рейки нивелирной, микронивелира с переменной базой и нониусного нутромера /9, 10/. Эти приборы были разработаны и изготовлены в ЛВЭ ОИЯИ.

Методика геодезических измерений.

С 1973 года ведутся систематические наблюдения за динамикой

высотных деформаций медианной поверхности ЭМ СФТ. К началу 1974 года была выполнена съемка положения медианной поверхности магнита ускорителя по высоте.

Для обеспечения постоянства отсчета в 1974 году на объекте была создана опорная сеть в виде куста глубинных инварных реперов. Куст расположен в 60 метрах от здания синхрофазотрона. Исходная отметка передается на шкалу № 35 высотной сети, расположенной на строительных колоннах в зале ускорителя.

Высотная сеть в зале СФТ закреплена 52 шкалами на несущих колоннах и вспомогательном оборудовании /рис.1/.

Для наблюдения за положением каждого блока на нем было закреплено по 4 шкалки. Из-за загроможденности зала синхрофазотрона вспомогательным и экспериментальным оборудованием удалось систематически следить лишь за 280 шкалками из 400. Положение этих точек определялось методом геометрического нивелирования коротким визирным лучом. От реперов высотной сети прокладывались висятые ходы максимум в две станции.

Медианная поверхность в первом приближении определяется как ломаная плоскость симметрии положения верхних и нижних полюсных наконечников. Отметки $H_{мп}$ точек, принадлежащих этой плоскости, можно вычислить, зная отметку нижнего полюсного наконечника $H_{нп}$ и величину зазора e .

$$H_{мп} = H_{нп} + \frac{e}{2}.$$

Решение задачи определения положения медианной поверхности было разделено на два этапа : определение положения нижних полюс-

ных наконечников ; измерение зазоров.

Поскольку при сборке ускорителя характерные точки полюсов ЭМ не были вынесены на внешние боковые поверхности стоек секторов квадрантов, измерения по определению топографии нижнего полюса ЭМ СФТ выполнялись непосредственно внутри вакуумной камеры. Измерения проводились в стесненных условиях, неблагоприятных для высокоточных измерений.

Подробная съемка топографии нижнего полюса выполнялась сочетанием 2-х методов геометрического нивелирования и микронивелирования.

Измерение величины зазоров производится :

- 1) путем геометрического нивелирования ;
- 2) с использованием специального нутромера.

Весьма существенным вопросом является оценка точности измерений и вычисленных данных. Взаимное положение реперов определялось со средней квадратичной погрешностью 0,02 мм, что с вероятностью 95 % гарантирует неизменность исходной отметки с погрешностью 0,05 мм. Средняя квадратичная погрешность передачи отметки от опорной сети на шкалу № 35 равна 0,15 мм.

При контроле высотного положения строительных конструкций и технологического оборудования средняя квадратичная погрешность определения одного превышения при длине визирного луча 6 м. из одностороннего хода при двух горизонтах инструмента $\int m = 0,060$ мм. Доказано / II / , что отметки реперов и их смещения практически независимы.

исследований можно охарактеризовать при помощи моделей, описывающих одним или несколькими уравнениями: положение всех контролируемых точек. Аналогичная методика анализа применяется в ядерной физике [12].

Для исследования высотных смещений строительных конструкций и технологического оборудования синхрофазотрона в качестве математической модели использовалась вероятнейшая плоскость

$$Ax + By + C - Z = 0,$$

где A - наклон оформляющей плоскости вдоль оси X ; B - наклон оформляющей плоскости вдоль оси Y ; C - расстояние по оси Z от начала системы координат до оформляющей плоскости. Значения параметров A , B , и C вычисляются по способу наименьших квадратов.

Изменение параметров вероятнейшей плоскости характеризует наклоны по направлению осей координат (ΔA и ΔB) и изменение расстояния от начала отсчета по третьей координате (ΔC):

$$\Delta A_{jk} = A_j - A_k;$$

$$\Delta B_{jk} = B_j - B_k;$$

$$\Delta C_{jk} = C_j - C_k,$$

где индексы j и k соответствуют сравниваемым положениям объекта на момент проведения соответствующих циклов.

Для выявления нелинейной составляющей вертикальных деформаций использован математический аппарат дисперсионного анализа. В качестве условного математического ожидания примем оформляющую плоскость. Разброс положения точек сооружения по высоте можно характеризовать дисперсией $D(\Delta)_{jk}$

$$D(\Delta)_j = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (z_{ij} - A_j x_i - B_j y_i - C_j)^2}{n-1},$$

где z_{ij} - измеренное (вычисленное) положение точки i в j -м цикле измерений; x_i, y_i - ее координаты; n - число точек.

Если дисперсии $D(\Delta)_j$ и $D(\Delta)_k$ равны, то можно считать, что сооружение перемещается как единое целое. Гипотезу о равенстве дисперсий можно проверить, вычислив их отношение

$$F = \frac{D(\Delta)_j}{D(\Delta)_k},$$

При $F \leq F_q$ можно считать, что изменение дисперсий не существенно. Значение F_q выбирается из таблиц /I3/ по числу точек и принятому уровню значимости, равному в нашем случае 5%. Аналогичное применение аппарата дисперсионного анализа приведено в работе /I4/.

Применение описанного выше математического аппарата к результатам повторных геодезических измерений позволило сделать следующие выводы:

1. Общие наклоны здания хорошо согласуются с изменением уровня грунтовых вод /рис.2/. С подъемом грунтовых вод здание в целом наклоняется таким образом, что участок, расположенный около третьего по ходу пучка квадранта, поднимается; участок, расположенный около первого по ходу пучка квадранта, опускается.

При опускании уровня грунтовых вод наблюдается обратный процесс.

2. Сезонные наклоны здания носят периодический характер. Изменение положения противоположных точек здания характеризуется величинами порядка 0,9 + 1,0 мм. Соответствующий график приведен на рис.3.

Кроме того, начиная с середины 1975 года, существенное влияние на общие наклоны здания синхрофазотрона начали оказывать возрастающие нагрузки в районе строительства нового экспериментального зала (корпус № 205). К середине 1976 года сооружение наклонилось в сторону третьего квадранта таким образом, что противоположные участки здания изменили свое положение по высоте в сравнении с 1973 годом на $1,9 + 2,0$ мм. К июлю 1976 года этот процесс еще не прекратился. В среднем здание синхрофазотрона наклонялось к новому павильону на $2,2 \cdot 10^{-6}$ рад. в месяц, что соответствует взаимному смещению противоположных точек на $0,2$ мм в месяц. Помимо выявленных общих наклонов здания, его отдельные элементы могут смещаться относительно друг друга.

Ход локальных деформаций можно объяснить ростом нагрузок в районе корпуса № 205. Основными являются осадки участков, расположенных около третьего по ходу пучка квадранта. Осадки участка здания, расположенного около второго квадранта, можно объяснить тем, что при общем наклоне здания в сторону третьего квадранта соответственного подъема в районе второго квадранта не происходит из-за нагрузки основания зданием 1Б. Осадки в районе третьего квадранта объясняются ростом нагрузок нового экспериментального зала.

По результатам периодических измерений вычислены характеристики смещений каждого квадранта как единого целого, и проверена гипотеза об отсутствии прогибов в азимутальном направлении. Оси X и Y выбраны параллельно торцам квадрантов. Все значения координат для каждого квадранта положительны.

Анализ показал, что наибольшие осадки квадрантов соответствуют их серединам. Поэтому по величинам наклонов оформляющих ΔA и ΔB вычислены углы наклона по направлению от центра кривизны квадрантов к их серединам $\Delta \beta$ (радиальный наклон) и наклоны по направлению, соединяющему торцы квадранта $\Delta \alpha$ (азимутальный наклон).

Знаки изменения наклонов $\Delta \beta$ и $\Delta \alpha$ выбраны, исходя из условия, что при $\Delta \beta > 0$ квадрант наклоняется так, что его радиальный наклон уменьшается; при $\Delta \alpha < 0$ квадрант наклоняется так, что его второй торец поднимается.

Сравнивая графики изменения наклонов различных квадрантов /рис.4, 5, 6, 7/, легко заметить, что характер этого вида деформаций для каждого из квадрантов носит частный характер.

Можно сделать следующие выводы :

1. Систематическое изменение наклонов квадрантов хорошо согласуется с исследованным ранее процессом наклонов основания сооружения. Можно отметить соответствие по направлению наклонов. Однако по величине наклонов квадрантов № I и III в 2-2,5 раза больше. Это можно объяснить тем, что на наклоны квадрантов оказывали влияние не только общие наклоны основания, но и локальная составляющая деформации основания.

2. Периодические изменения наклонов основания и квадрантов плохо согласуются друг с другом.

Исследование конической формы нижнего полюса сведено к исследованиям плоскостей, аппроксимирующих эту поверхность, так как математический смысл исследований при этом не меняется, а

вычисления принимают более компактный вид. Теоретический рельеф нижнего полюса электромагнита был аппроксимирован плоскостью.

Выявленные наклоны квадрантов можно проиллюстрировать следующими цифрами :

- медианная плоскость в середине третьего квадранта наклонилась таким образом, что на базе 1600 мм разность осадок составила 2,2 мм, в то время как для второго квадранта эта величина составила 3,7 мм ;

- середина третьего квадранта оказалась ниже его торцов на 11,6 мм, в то время как для второго квадранта эта величина составила 19,4 мм ;

- третий квадрант наклонился по ходу пучка таким образом, что разница отметок его торцов составила 4,7 мм, а для первого и второго квадрантов всего 1,2 мм.

Максимальное значение F_c получено для четвертого квадранта. Рассмотрим, насколько существенен этот вид деформаций. Для этого сравним отклонения от оформляющих плоскостей характерных точек нижнего полюса, расположенных на $R_0 \pm 800$ мм в торцах и середине квадранта. Установлено, что квадрант больше прогнут по дуге $R_0 + 800$, однако величины стрелок прогиба меньше допуска на установку полюса квадранта, равного 2 мм. Поэтому считать их существенными нельзя. Следовательно, первоначальное предположение о том, что квадранты смещаются как единое целое, правильно.

Кроме наклона в радиальном направлении и деформаций, каждый квадрант за 20 лет переместился и в вертикальном направлении. Для

установления взаимных вертикальных перемещений квадранта сравним значения Δz неравномерности вертикального смещения середин квадрантов по отношению к первому квадранту.

По результатам вычислений получены следующие значения :

$$\Delta z_{II-I} = 11,3 \text{ мм} ; \quad \Delta z_{III-I} = -7,3 \text{ мм} ; \quad \Delta z_{IV-I} = -3,3 \text{ мм}.$$

В результате выполненного анализа можно утверждать, что каждый квадрант ускорителя сместился относительно проектного положения как единое целое. Таким же образом протекают и его сезонные осадки. Никаких прогибов, описанных в работах А.Н.Комаровского, нет.

Заключение.

1. Результаты проводимых систематических геодезических измерений дают основание утверждать, что процесс изменения деформаций магнита происходит во времени в связи с изменением внешних условий.
2. Изменение деформаций магнита приводит к искажению магнитного поля, которое необходимо исследовать и корректировать наиболее приемлемым в данный момент путем (электрические коррекции поля или юстировка ЭМ СФТ).
3. Результаты измерений уже частично использованы для изучения динамики пучка экспериментальным и расчетным путем.
4. Анализ результатов геодезических измерений указывает на то, что контроль положения электромагнита ускорителя во времени необходимо делать более часто, а не только в период профилактических остановок, для чего в настоящее время создана геодезическая

система, состоящая из гидростатических датчиков с дистанционным съемом информации /15/ .

Литература.

1. В.И.Векслер и др. Физические основы сооружения синхрофазотрона на 10 ГэВ. В сб. "Ускорители элементарных частиц", Москва, Атомиздат, 1957, с.3-12.
2. Komar E.G. et al CERN vol.1, Symposium(1956), 382- 384 .
3. А.Н.Комаровский "Строительные конструкции ускорителей", Москва, "Высшая школа", 1961.
4. E.Corsand, E.J.Lofgren, Bevatron operation and development. II UCRL - 2692, September 13, 1954.
5. P.Bowles at al. Международная конференция по ускорителям, Дубна, 21-27 августа 1963. М: Атомиздат, 1964
6. Ю.Д.Безногих и др. ОИЯИ, Б2-9-7208, Дубна, 1972.
7. Б.В.Василишин и др. ОИЯИ, Б1-9-8031, Дубна, 1974.
8. Х.К.Ямбаев. Высокоточные створные измерения при строительстве ускорителей (ЦНИИАТОМИНФОРМ), Москва, 1974.
9. Ю.Е.Федосеев и др. Высокоточный геодезический контроль положения электромагнита синхрофазотрона ОИЯИ. В сб. "Вопросы атомной науки и техники", сер."Проектирование", вып.2 (II), Москва, ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1975, с.II-2I.
10. В.И.Черников, Ю.Е.Федосеев. Нестандартные высокоточные геодезические приборы для измерения высотного положения магнита синхрофазотрона ОИЯИ. В сб. "Исследования по геодезии и аэрофото-съемке и картографии" сер. "Прикладная геодезия", вып.I /I/, Москва, НИИГАиК, 1976, с.176-184.
11. И.Ю.Васютинский и др. ОИЯИ, Б2-9-11582, Дубна, 1978.

12. В.Б.Злокатов, ОИЯИ, Р11-10186, 1976.

13. Н.Г.Видуев, Г.С.Кондра. Вероятностно-статистический анализ погрешностей измерений, "Недра", Москва, 1969.

14. В.Е.Сытник, Х.Муберанов. Анализ результатов геодезических измерений осадки зданий повышенной этажности, возводимых в сейсмоопасных районах. сб. "Инженерная геодезия", вып.13, Будивельник, Киев, 1973.

15. И.Ю.Васютинский и др. ОИЯИ, 9-11329, Дубна, 1978.

В.Б.Злокатов
Н.Г.Видуев
Г.С.Кондра
В.Е.Сытник
Х.Муберанов
И.Ю.Васютинский
и др.

Д.А.Торель
В.В.Зуб

А.И.Терехин
С.И.Чумаков
В.А.Секретов
М.В.Сидоров
С.И.Сидоров

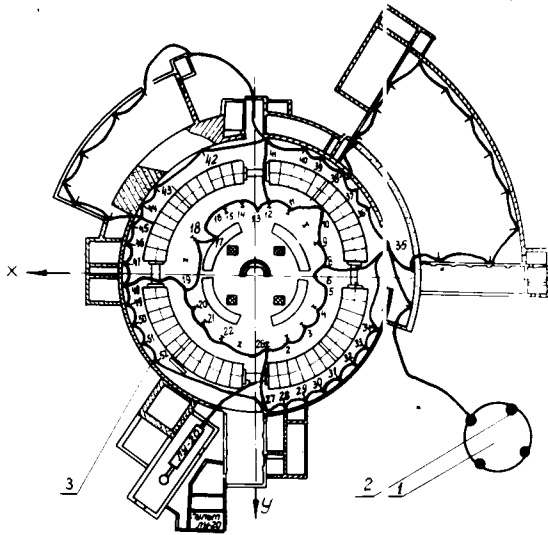


Рис.1. Схема расположения высотной геодезической сети в здании микрофазотрона и экспериментальных залах:

- 1) - "куст" реперов;**
- 2) - репер инварный;**
- 3) - шкалка рабочей сети.**

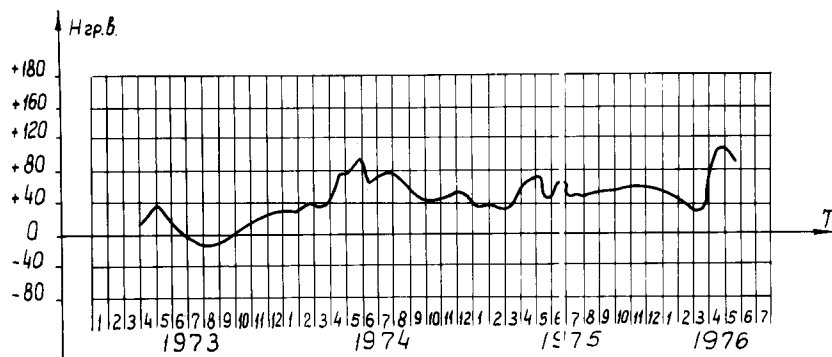


Рис.2. График изменения грунтовых юд в районе г.Дубны.

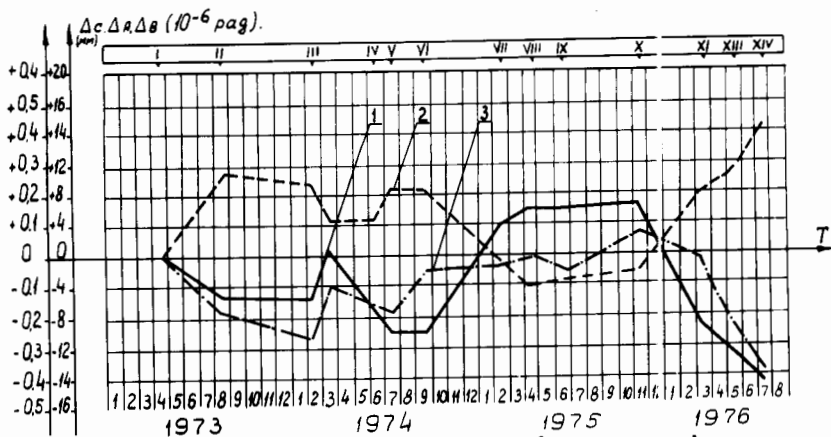


Рис. 3. График изменения наклонов здания синхротрона:

- 1) - наклоны вдоль оси X ($\Delta \bar{A}$);
- 2) - наклоны вдоль оси Y ($\Delta \bar{B}$);
- 3) - параллельное смещение вдоль оси Z ($\Delta \bar{C}$).

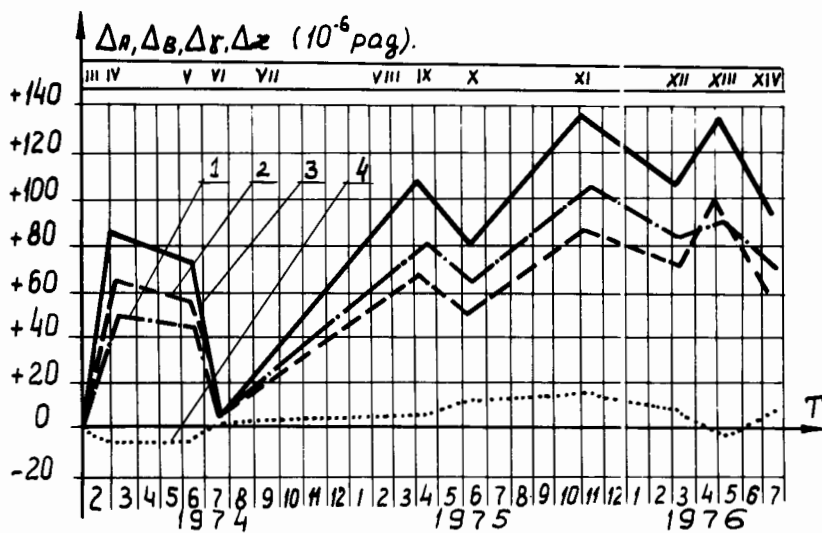


Рис. 4. График изменения наклонов первого квадранта:

- 1) - изменение наклонов по оси X ($\Delta \bar{A}$);
- 2) - изменение наклонов по оси Y ($\Delta \bar{B}$);
- 3) - изменение радиальных наклонов $\Delta \bar{\gamma}$;
- 4) - изменение азимутальных наклонов $\Delta \bar{z}$.

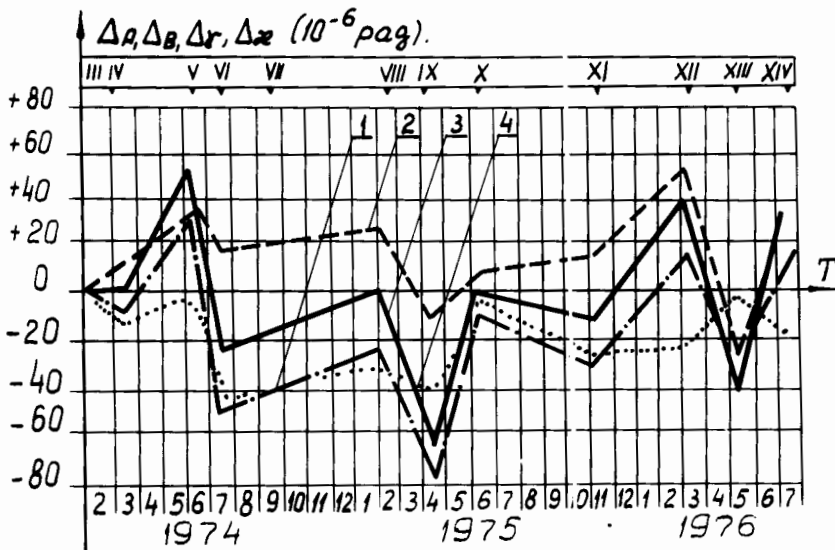


Рис.5. График изменения наклонов второго квадранта:

- 1) - изменение наклонов по оси X (ΔA);
- 2) - изменение наклонов по оси Y (ΔB);
- 3) - изменение радиальных наклонов $\Delta \gamma$;
- 4) - изменение азимутальных наклонов $\Delta \alpha$.

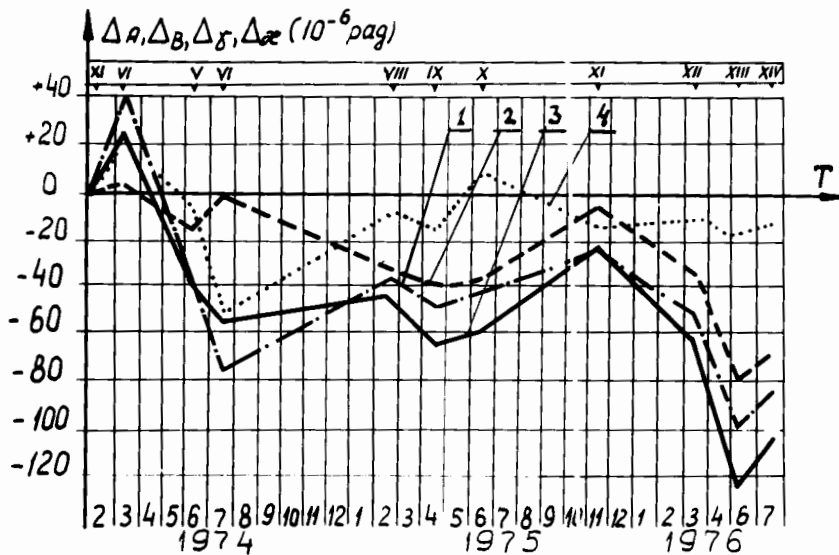


Рис.6. График изменения наклонов третьего квадранта:

- 1) - изменение наклонов по оси X (ΔA);
- 2) - изменение наклонов по оси Y (ΔB);
- 3) - изменение радиальных наклонов $\Delta \gamma$;
- 4) - изменение азимутальных наклонов $\Delta \alpha$.

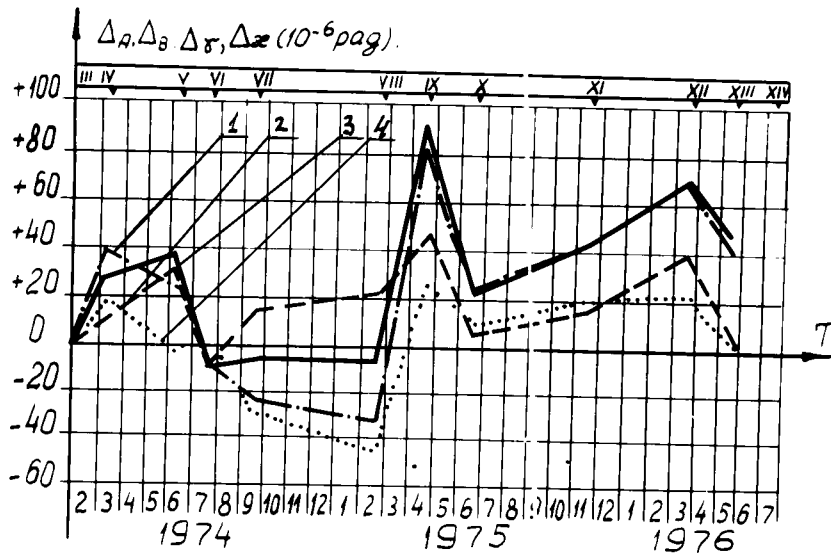


Рис.7. График изменения наклонов четвертого квадранта:

- 1) - изменение наклонов по оси X ($\Delta \alpha$);
- 2) - изменение наклонов по оси Y ($\Delta \beta$);
- 3) - изменение радиальных наклонов $\Delta \gamma_r$;
- 4) - изменение азимутальных наклонов $\Delta \gamma_a$.