

*И. ПАЭСАЛУ*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВЗАМОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СМЕЩЕНИЯ НУЛЬ-ПУНКТА ГРАВИМЕТРА Gs-11 № 147 И АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

С повышением точности земноприливных наблюдений становится актуальной проблема определения влияния возмущающих факторов на запись приливов. Один из возмущающих факторов — изменяющееся атмосферное давление.

Ранее (Паэсалу, 1984) предлагался метод, позволяющий оценить барическое влияние на гравиметрическую запись. На материале Таллинской пятимесячной серии земноприливных наблюдений в 1976—1977 гг. этим методом было найдено, что 31% дисперсии нуль-пункта гравиметра Gs-11 № 147 был обусловлен воздействием атмосферного давления главным образом на прибор. Коэффициент регрессии (общий барометрический коэффициент гравиметра) составлял 1,9 мкГал/мбар, а коэффициент корреляции был равен 0,56.

Для более детального изучения барического влияния на гравиметрическую запись больше подходит, по нашему мнению, взаимоспектральный анализ (Дженкинс, Ваттс, 1972). Этот метод позволяет найти взаимные спектры составляющих временных рядов, которые характеризуют их связь на различных частотах.

Взаимоамплитудный спектр пропорционален произведению амплитуд одних и тех же частотных компонентов двух рядов. Взаимный фазовый спектр характеризует разность фаз двух процессов на различных частотах и, значит, по этому спектру можно определить запаздывание возмущающего воздействия (в нашем случае — запаздывание влияния давления) на гравиметрическую запись. Спектр когерентности показывает зависимость квадрата коэффициента корреляции от частоты, т. е. дает частотное распределение силы связи.

Кроме названных трех типов спектров, предлагаемый метод позволяет оценить и амплитудную передаточную функцию гравиметра по отношению к давлению в зависимости от частоты. Амплитудную передаточную функцию же можно рассматривать как барометрический коэффициент гравиметра. Таким образом, учитывая взаимный фазовый спектр, мы можем определить как амплитудную, так и фазовую частотную характеристику показаний гравиметра по отношению к воздействию давления. Ясно, что такой анализ даст нам гораздо больше информации о воздействии давления на гравиметр, чем обычный корреляционный.

Метод взаимоспектрального анализа опробован на том же материале Таллинских земноприливных наблюдений, что и метод скользящего среднего и корреляционно-регрессионного анализов, описанный ранее (Паэсалу, 1984). Исходными данными для анализа служили т. н. остатки смещения нуль-пункта и атмосферного давления, определенные как отклонения от скользящего среднего за 10 суток. Такую

величину интервала усреднения выбирали в целях исследования достаточно широкой частотной области. Скользящее среднее исключает из временных рядов тренд. Это является необходимым условием спектрального анализа.

После нахождения остатков нуль-пункта и давления вычислялись как автоковариационные, так и взаимоквариационная их функции. Как известно (Дженкинс, Ваттс, 1971), перед спектральным анализом ковариационную функцию необходимо отсечь. Отсечение соответствует сглаживанию спектра в частотной области и делается для увеличения устойчивости спектральных оценок. В нашем случае отсечение авто- и взаимоквариационных функций производилось при числе шагов запаздывания 720 ч, т.е. один ряд был максимально сдвинут относительно другого на месяц. Такое довольно большое число точек, отсеченных при длине отфильтрованной записи 3360 ординат, выбрали для того, чтобы получить более высокую разрешающую способность спектра.

Во избежание влияния острых углов, возникающих в точках отсечения ковариационных функций, последние просматривались через временные окна, ординаты которых в концах плавно падали до нуля. Такая процедура означает, что ординаты ковариационной функции умножаются на определенную весовую (окно), а дальнейшая обработка идет уже с «взвешенной» ковариационной функцией. Использовались окна двух видов: во-первых, окно, представляющее собой (как в начале, так и в конце 10% своей ширины) приподнятую синусоиду и равное единице между начальным и конечным участками (далее в статье — промежуточное окно); во-вторых, окно Ханна (Дженкинс, Ваттс, 1971). Промежуточное окно дает возможность оценить спектр более детально, но дисперсия при этом больше. При помощи окна Ханна с меньшей дисперсией получаем более сглаженную оценку спектра (рис. 1а, б). После использования двух видов окон, ковариационные функции подвергали преобразованию Фурье. Все вычисления производили на ЭВМ «Минск-32». Программа для нахождения остатков была составлена нами. Программы для ковариационных функций

и спектрального анализа заимствованы (Сборник..., 1974; Алгоритмы..., 1979).

Рассмотрим сначала спектры нуль-пункта и атмосферного давления, полученные промежуточным временным окном (рис. 1а). Главный пик в обоих спектрах наблюдается на частоте около 4 единиц (1 ед. =  $10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ), т.е. при периоде около 250 ч (точнее, 266,7 ч). Как будто максимальный пик (максимум)

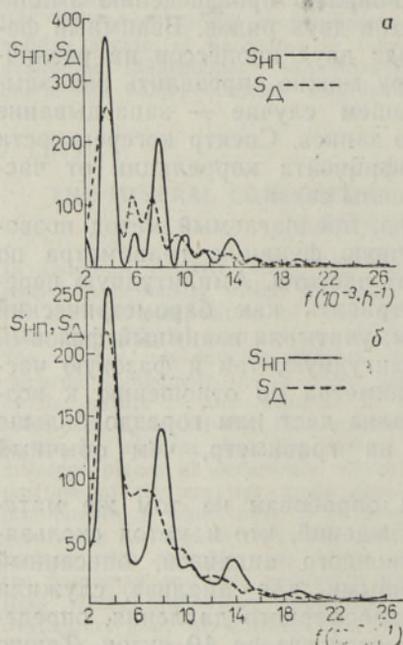


Рис. 1. Спектры нуль-пункта ( $S_{нп}$ ) и атмосферного давления ( $S_{д}$ ), полученные путем применения промежуточного временного окна (а) и то же путем применения временного окна Ханна (б).

на этой частоте в нуль-пункте обязан своим происхождением пику давления. (В дальнейшем мы увидим, что это утверждение справедливо только частично.) Следующий по величине пик в нуль-пункте наблюдается на частоте 8 единиц, т. е. для периода 125 ч. Но в спектре давления точно на этой частоте пика нет, а наблюдаются два максимума в частотном интервале между пиками спектра нуль-пункта, при этом правосторонний пик в спектре давления частично перекрывает пик в нуль-пункте на частоте 8 единиц. Значит, этот максимум в нуль-пункте только частично может быть вызван давлением. Что касается небольшого пика в спектре нуль-пункта на частоте 6 единиц, то он, по всей видимости, является боковым лепестком главного максимума. (В спектре нуль-пункта, полученном путем использования временного окна Ханна (рис. 1б), этого бокового лепестка нет.)

Как видно на рис. 1а, в полосе частот от 9 до 15 единиц спектры и нуль-пункта, и давления меняются гораздо меньше. Наблюдаются три небольших пика, которые в спектре нуль-пункта лучше вырисовываются. Спектры этой области также в некоторой степени сходны, в частности около частоты 10 единиц. Но точность ординат спектра в этом диапазоне меньше, чем в диапазоне главных пиков из-за меньшей величины этих ординат. Частотный интервал более 15 единиц мы подробно не рассматриваем, поскольку в целом интенсивность спектра здесь мала. Отметим только небольшой пик в спектре нуль-пункта на частоте 19,2 единиц (52 ч), не связанный с давлением. (На этом месте в спектре атмосферного давления наблюдается минимум.)

Взаимоамплитудный спектр и спектр когерентности приведены на рис. 2а. Здесь изображена и амплитудная передаточная функция гравиметра, т. е. общий барометрический коэффициент. Для получения более устойчивых оценок использовано только окно Ханна. Нам представляется, что эти графики целесообразно разделить по частоте на четыре полосы, границы которых соответствуют приблизительно минимумам спектров когерентности и взаимноамплитудного: 2—6, 6—9, 9—15 единиц, затем от 15 до конца. В первой полосе находится главный пик взаимного спектра, но сила связи, которую показывает спектр когерентности, не наибольшая. В следующей полосе наблюдается следующий по величине максимум взаимного спектра. Последний подтверждается спектром когерентности, который указывает на уменьшение силы связи в этом частотном диапазоне, что и следовало ожидать, поскольку пики нуль-пункта и давления только частично

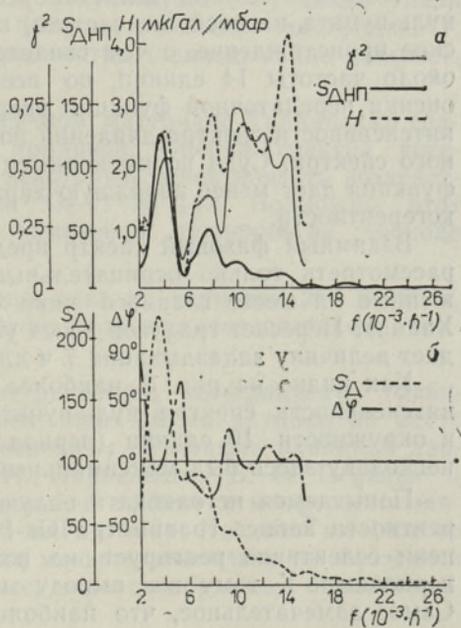


Рис. 2. Спектр когерентности между атмосферным давлением и нуль-пунктом ( $\gamma^2$ ), взаимный спектр ( $S_{\Delta, \text{нп}}$ ) и амплитудная передаточная функция ( $H$ ) (а), а также взаимный фазовый спектр ( $\Delta\varphi$ ) и спектр атмосферного давления, полученный путем применения временного окна Ханна ( $S_{\Delta}$ ) (б).

перекрываются (рис. 1а). Если связь между давлением и нуль-пунктом здесь и существует, то замаскирована довольно высоким пиком в нуль-пункте на частоте 8 единиц, по всей видимости, небарического происхождения.

В полосе частот 9—15 единиц взаимный спектр имеет два небольших пиков и убывает. А в спектре когерентности наблюдается максимум на частоте 10 единиц (период 100 ч), соответствующий небольшому бугорку во взаимном спектре. В общем, в этом диапазоне частот средний уровень спектра когерентности несколько выше, чем в ранее рассмотренных полосах. Однако из-за небольших величин интенсивностей спектров давления и нуль-пункта в этой полосе точность спектра когерентности не может быть высокой и спектр легко искажается под влиянием посторонних и более интенсивных по отношению к давлению факторов (температура, электрические помехи и т. д.). Но все же в предыдущей работе (Паэсалу, 1984) мы нашли, что коэффициент корреляции между атмосферным давлением и нуль-пунктом достигает максимального значения при четырех- и пятилучных периодах. Спектр когерентности дает частотное распределение силы связи более четко — главный пик на частоте 10 единиц. Последний хорошо совпадает с четырехсуточным периодом. Итак, по-видимому, в полосе частот в окрестности 10 единиц (100 ч) запись гравиметра Gs-11 № 147 наиболее чувствительна к изменениям давления.

За частотой 15 единиц интенсивность в спектрах давления и нуль-пункта, следовательно, и во взаимном спектре становится незначительной. Точность ее определения все ухудшается. Крупные искажения могут возникнуть уже в спектре когерентности, поскольку он представляет собой отношение квадрата взаимного амплитудного спектра к спектрам нуль-пункта и давления. При такой операции относительные погрешности суммируются. По этой причине данный участок спектра когерентности не рассматривается, как и соответствующие участки амплитудной передаточной функции и фазового спектра.

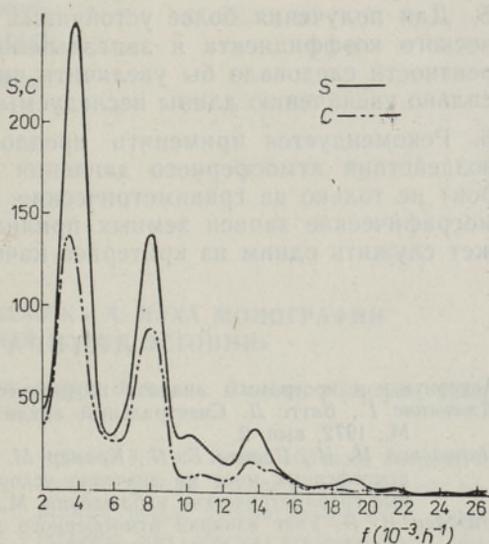
Амплитудная передаточная функция (рис. 2а) в общих чертах прослеживает спектр когерентности, что и понятно: чем сильнее связь, тем больше должно сказаться давление на гравиметре. Высокий пик на частоте 8 единиц является результатом влияния пика в спектре нуль-пункта на этой же частоте, который имеет в основном небарическое происхождение, о чем свидетельствует спектр когерентности. Пик около частоты 14 единиц, по всей видимости, является смещением оценки передаточной функции вверх из-за более быстрого уменьшения интенсивности спектра давления по сравнению с интенсивностью взаимного спектра. Судя по имеющимся данным, амплитудная передаточная функция дает менее надежную характеристику взаимосвязи, чем спектр когерентности.

Взаимный фазовый спектр представлен на рис. 2б. Здесь разумно рассмотреть только отрицательные значения этого спектра, расположенные на месте главного пика спектра давления (временное окно Ханна). Пересчет градусов через угловую скорость на единицу времени дает величину запаздывания 7 ч для периода 308 ч.

Как видно на рис. 3, наиболее заметное относительное уменьшение интенсивности спектра нуль-пункта наблюдается в частотной полосе в окрестности 10 единиц (период 100 ч), что и следовало ожидать, поскольку здесь был максимальный коэффициент когерентности.

Попытаемся истолковать полученные результаты. По спектру когерентности запись гравиметра Gs-11 № 147, видимо, в некоторой степени селективно реагирует на воздействие давления с различными периодами. К тому же выводу мы пришли ранее (Паэсалу, 1984). Самое замечательное, что наибольшему пику в спектре давления не

Рис. 3. Спектр нуля-пункта до (S) и после (C) исключения влияния атмосферного давления, полученный путем применения временного окна Ханна.



соответствует наибольший пик в спектре когерентности. Если это действительно так, то зависимость показаний гравиметра от скорости изменения давления превалирует над зависимостью от интенсивности давления. Но на основе имеющихся данных об этом уверенно говорить нельзя, поскольку в нуля-пункте были и другие помехи. Это разъясняется ниже.

Как видно на спектре «остаточного шума» (рис. 3), исключение влияния давления только незначительно исправляет частотную структуру нуля-пункта. По всей видимости, здесь имеется дело с другими возмущающими гравиметрическую запись факторами, действующими в унисон с давлением или на близких к нему частотах. Последние могут исказить и картину влияния давления.

### Основные результаты

1. Предложен метод взаимоспектрального анализа, основывающийся на статистических началах и позволяющий оценить частотное распределение: а) силы связи между возмущающим фактором (атмосферное давление) и гравиметрической записью (нуль-пункт); б) амплитудной передаточной функции гравиметра (барометрический коэффициент); в) фазовой передаточной функции гравиметра (запаздывание воздействия давления на прибор).
2. Метод был опробован на пятимесячном материале Таллинских гравиметрических наблюдений земных приливов. Оценка спектра когерентности позволяет предположить некоторую селективность воздействия давления на запись гравиметра Gs-11 № 147. Возможно, этот прибор лучше всего реагирует на изменения давления на периоде 100 ч.
3. В спектре нуля-пункта обнаружены пики на периодах 267 и 125 ч, первый из которых главный и частично объясним воздействием атмосферного давления.
4. Довольно высокая оценка барометрического коэффициента гравиметра Gs-11 № 147, достигающая величины 2,6 мкГал/мбар на месте главного пика спектра давления, в основном объяснима влиянием давления на прибор. В работе Н. Н. Парийского, Б. П. Перцева и М. В. Крамер (1982) неинструментальный эффект атмосферного давления оценивается величиной  $-0,406$  мкГал/мбар. Но для Таллинского пункта наблюдения эта величина еще меньше, поскольку он находится недалеко от моря ( $\sim 1$  км). Море же, являясь обратным барометром, уменьшает этот коэффициент.

5. Для получения более устойчивых оценок как спектров барометрического коэффициента и запаздывания по фазе, так и спектра когерентности следовало бы увеличить число степеней свободы, что равносильно увеличению длины исследуемых рядов.

6. Рекомендуется применять предложенный метод для оценивания воздействия атмосферного давления (и других возмущающих факторов) не только на гравиметрические, но и на наклонные и деформографические записи земных приливов. Такая численная оценка может служить одним из критериев качества земноприливных измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Алгоритмы и программы анализа геофизических исследований. Минск, 1979, 7—36.  
Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М., 1971, вып. 1; М., 1972, вып. 2.  
Парийский Н. Н., Перцев Б. П., Крамер М. В. Влияние изменений в распределении атмосферных масс на значение ускорения силы тяжести. — В кн.: Повторные гравиметрические наблюдения. М., 1982, 12—26.  
Пазсалу И. И. Учет влияния атмосферного давления на смещение нуля-пункта гравиметра Gs-11 № 147 методом корреляционно-регрессионного анализа. — В кн.: Хронология и формирование четвертичного покрова Эстонии. Таллин, 1984, 76—83.  
Сборник научных программ на ФОРТРАНе. М., 1974, вып. 1, 97—99.

Институт геологии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
16/IV 1984

J. PAESALU

#### GRAVIMEETRI Gs-11 NR. 147 NULLPUNKTI NIHKUMISE JA ÕHURÕHU VASTASTIKUSE SPEKTRAALANALÜÜSI TULEMUSED

Et uurida õhurõhu mõju maakoore loodete gravimeetritele vaatlustele, on soovitatud kasutada vastastikuse spektraalanalüüsi meetodit. Selle meetodiga on analüüsitud viie kuu jooksul Tallinnas tehtud mõõtmisi. Gravimeetri nullpunkti nihkumise spektris leiti kaks maksimumi: 267. ja 125. tunni ajal. Esimene neist on suures osas seletatav õhurõhu mõjuga. 267-tunnisel perioodil ulatus gravimeetri Gs-11 nr. 147 baromeetriline koefitsient  $2,6 \mu\text{Gal}/\text{mbar}$ , mis näitab, et õhurõhk mõjutab otseselt instrumenti.

J. PAESALU

#### RESULTS OF THE CROSS-SPECTRUM ANALYSIS OF THE GRAVITY METER Gs-11 N 147 ZERO-POINT DRIFT AND THE ATMOSPHERIC PRESSURE

In this article the author recommends to estimate the atmospheric pressure influence on the gravimetric tidal record by means of a cross-spectrum analysis. As an example, this method was applied at analyzing zero-point drift of the gravity meter Gs-11 N 147 and the atmospheric pressure during five months. The peaks of the zero-point drift spectrum occurred at the periods of 267 and 125 hours. The first peak is the main one, and may be partly explained by the influence of the atmospheric pressure. In the period of the main peak the general barometric coefficient was  $2.6 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{mbar}$ . This quantity gives evidence about the direct effect of the atmospheric pressure on the gravity meter.