

УДК 528.27+525.622

**В. Г. Баленко¹, В. Г. Голубицкий¹, В. П. Шляховый¹,
И. Ю. Богдан², Т. Н. Бабич¹**

¹Полтавская гравиметрическая обсерватория
Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины
36029 Полтава, ул. Мясоедова, 27/29

²Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка
36011 Полтава, Первомайский проспект, 24

Результаты земноприливных наклономерных наблюдений на геофизической станции «Судиевка»

Выполнен гармонический анализ наклономерных наблюдений на геофизической станции «Судиевка» с применением способа вторых разностей. Уточнены параметры приливных волн для этого пункта, по которым определены числа Лява.

РЕЗУЛЬТАТИ ЗЕМНОПРИПЛИВНИХ НАХИЛОМІРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА ГЕОФІЗИЧНІЙ СТАНЦІЇ «СУДІЇВКА», Баленко В. Г., Голубицький В. Г., Шляховий В. П., Богдан І. Ю., Бабич Т. Н. — Виконано гармонічний аналіз нахиломірних спостережень на геофізичній станції «Судіївка» з використанням способу других різниць. Уточнено параметри припливних хвиль для цього пункту, за якими отримано числа Лява.

SOME RESULTS OF TIDAL TILTMETRIC OBSERVATIONS AT THE GEOPHYSICAL STATION SUDIEVKA, by Balenko V. G., Golubitskii V. G., Shliakhovyi V. P., Bogdan I. Yu., Babich T. N. — A harmonic analysis of the data of tiltmetric observations at the Sudievka station is performed by the method of second differences. Parameters of tidal waves for the station are improved. The Love elastic numbers are calculated.

С 1970-х гг. по некоторым причинам не произошло заметного прогресса в экспериментальной базе наклономерных наблюдений, и последние в Европе практически прекратились. Однако уточнение ранее полученных результатов в этой области геодинамики не потеряло своей актуальности, а поэтому в Полтавской гравиметрической обсерватории было принято решение обработать наклономерные наблюдения, ранее полученные на базовых станциях на территории Украины, с использованием современных методов анализа. Одной из таких геофизических станций является «Судиевка», расположенная в 15 км южнее г. Полтавы.

Земноприливные наклономерные наблюдения на станции «Судиевка» выполнены в два этапа: на первом этапе под руководством П. С. Матвеева в 1971—1973 гг. наклономерами системы Островского (НФО) [4] и на втором — этапе под руководством В. П. Шляхового в 1979—1981 гг.

наклономерами той же системы, но работающими в автокомпенсационном режиме (НФОА) [9]. Приборы были установлены в шурфе глубиной 12 м.

Запись наклонов за 1971—1973 гг. подвергалась гармоническому анализу месячными сериями методом Матвеева с перекрытием от 5 до 8 сут [4]. Не анализировались наблюдения в зимнее время, поскольку они сильно возмущены помехами метеорологического происхождения. Результаты гармонического анализа наклономерных наблюдений в 1979—1981 гг. частично опубликованы в работе [9].

Гармонический или спектральный анализ земноприливных наблюдений требует предварительного исключения из них дрейфа записи. Для этой цели разработано несколько методов. Чаще всего использовались методы Перцева и Венедикова. Однако все известные методы исключения дрейфа эффективны только тогда, когда из них предварительно исключены кратковременные возмущения типа скачков, затяжек и т. п. В «выглаживании» дрейфа состоит первичная подготовка к дальнейшему анализу ординат записи приливорегистрирующих приборов. Основной недостаток традиционных применявшихся для этого методов состоит в том, что они в большей или меньшей мере искажают периодическую составляющую записи прилива.

Далее из приливных ординат одним из комбинационных методов исключались первые составляющие полинома, которым моделируется дрейф на отрезках записи, охватываемой комбинацией.

Все комбинационные методы исключения дрейфа имеют общий недостаток. В интервалах суточных и полусуточных волн они полностью гасят только одну волну. Остальные волны гасятся не полностью, и их остатки исключаются вместе с дрейфом. Чтобы эти остатки существенно не влияли на определяемые амплитуды и фазы приливных волн, комбинации должны охватывать как можно больше ординат. Однако чем длиннее комбинация, тем хуже реальный дрейф моделируется полиномом на отрезке комбинации. Возникшее противоречие решается путем компромисса. В методе Перцева комбинация охватывает 37 ординат, а в методе Венедикова — 48 ординат.

Для переобработки длительных рядов наклономерных наблюдений в Полтавской гравиметрической обсерватории разработан новый метод подготовки ординат к гармоническому анализу, который лишен вышеупомянутых недостатков. Он получил наименование метода «вторых разностей».

Суть этого метода состоит в следующем.

По длительным наклономерным наблюдениям, когда на данной станции ранее традиционными методами получаются параметры приливных волн γ и $\Delta\varphi$, вычисляется приливная кривая как сумма всех волн разложения в гармоники приливного потенциала (например, разложения Картрайта). Назовем эту кривую синтезированной.

Далее вычтем ординаты синтезированной кривой из соответствующих ординат записи наклономера. Получим ординаты дрейфа Y_1 (первая разность).

В дрейфе отнимем от последующей ординаты предыдущую. Получим вторые разности $\Delta_1 = Y_{i+1} - Y_i$. Вторые разности очень чувствительны к любым кратковременным возмущениям дрейфа и погрешностям в измеренных ординатах. Это позволяет эффективно их устранить. Получаем «выглаженный» дрейф.

Далее к такому дрейфу прибавляются ранее вычтенные ординаты синтезированной кривой. Получаем ряд ординат с выглаженным дрейфом и неизменившейся приливной периодической составляющей, которые можно анализировать, например, методом Венедикова 1998 [12].

Метод вторых разностей также позволяет существенно ослабить вышеупомянутые недостатки комбинационных методов исключения дрейфа из записи наклонов. Для этого вычисляются несколько рядов ординат.

Алгоритм предлагаемого способа заключается в следующем.

Первый ряд — ординаты наклонов после исключения кратковременных возмущений дрейфа методом вторых разностей.

Второй ряд — синтезированная кривая.

Третий ряд — ординаты дрейфа Y_i как разность ординат первого и второго рядов.

Четвертый ряд — вторые разности $\Delta_i = Y_{i+1} - Y_i$.

Пятый ряд получается, если все четыре ряда разделить на шестичасовые интервалы, в каждом интервале первого ряда из шести ординат вычесть первую ординату, чем исключается постоянная составляющая дрейфа.

Шестой ряд — в каждом шестичасовом интервале четвертого ряда вычисляется среднее значение из вторых разностей $\bar{\Delta}_i = 1/6 \sum \Delta_i$ и составляются последовательности $0; \bar{\Delta}_1; 2\bar{\Delta}_1; 3\bar{\Delta}_1; 4\bar{\Delta}_1; 5\bar{\Delta}_1$.

Седьмой ряд. Из приливных ординат пятого ряда вычтем соответствующие величины шестого ряда. Получим ряд приливных ординат, в котором на каждом шестичасовом интервале из дрейфа исключены линейная и постоянная составляющие. Есть скачки на границах шестичасовых интервалов. Их следует учесть или цифровыми комбинациями (методы Леколязе, Дубика), или так, чтобы после введения скачка разность ординат по обеим его сторонам была такой же, как и в ординатах синтезированной кривой. Оба способа дают результаты, совпадающие в пределах ошибок их определения. Далее ординаты следует подвергнуть гармоническому анализу методом Венедикова 1998 [12].

Всякое разбиение ряда чисел на одинаковые интервалы вносит некую фиктивную волну. Разбиение на шестичасовые интервалы вносит в приливные ординаты фиктивную четвертьсуточную волну, которой нет в упругом земном приливе, поэтому деление ординат на шестичасовые интервалы не вносит искажений в выделяемые волны земного прилива.

Вышеизложенным способом на первом этапе были переобработаны независимыми месячными сериями все наклономерные наблюдения на станции Судиевка как в летнее, так и в зимнее время. Оказалось, что и в зимнее время полученные параметры γ и $\Delta\varphi$ можно использовать для последующего рассмотрения. Поэтому на втором этапе запись наклономеров анализировалась по каждому прибору одним массивом длительностью от одного до двух лет. Результаты гармонического анализа помещены в табл. 1—2.

В Полтавской гравиметрической обсерватории выполнен длительный ряд (16 годовых серий) наблюдений вариации величины силы тяжести. Результаты этих наблюдений опубликованы в работе [1]. Получены высокоточные значения амплитуд и фаз приливных волн. Это позволяет из результатов земноприливных наблюдений в регионе Полтава — Судиевка вычислить значения чисел Лява по формулам

$$h = (3\gamma + 2\delta) \text{ и } k = 4 - 2(\gamma + \delta).$$

Чтобы использовать эти уравнения, из параметров γ и δ следует исключить вторичные эффекты: влияние океанического прилива, эффекты топографии и т. п.

Для волн O_1 и M_2 поправки за влияние дальних зон океанического прилива в параметры γ и δ были вычислены в Институте физики Земли АН СССР [5], а поправки за влияние рельефа — в Полтавской гравиметрической обсерватории [2]. Получено:

Таблица 1. Значения параметров γ и $\Delta\varphi$ (станция Судиевка, север — юг)

Волны	Приборы				Среднее арифметическое	Исправленное за прилив в океане
	НФОА-17, 07.12.1979— 30.04.1981	НФО-08, 11.03.1971— 04.01.1972	НФО-08, 16.03.1972— 09.01.1973	НФО-57, 02.10.1971— 20.09.1973		
γ (север — юг)						
Q_1	0.7783±0.0863	0.7483±0.0435	0.7200±0.0378	0.7384±0.0445	0.7462±0.0565	
O_1	0.8027±0.0161	0.7610±0.0085	0.7749±0.0070	0.7788±0.0079	0.7794±0.0105	0.7400
M_1	0.9271±0.1106	0.7303±0.0625	0.7999±0.0526	0.7247±0.0605	0.7955±0.0751	
P_1	0.7407±0.0297	0.7768±0.0220	0.7960±0.0175	0.7932±0.0185	0.7767±0.0224	
S_1	3.1567±1.8324	0.6651±1.2884	1.6044±1.0313	2.2112±1.0995	1.9094±1.3500	
K_1	0.7827±0.0109	0.7688±0.0066	0.7516±0.0054	0.7713±0.0058	0.7686±0.0075	0.7690
J_1	0.9416±0.2162	0.6414±0.1005	0.4469±0.1006	0.4768±0.1197	0.6267±0.1426	
OO_1	0.9519±0.3981	0.9146±0.1335	0.7798±0.1384	0.6975±0.1536	0.8360±0.2340	
$2N_2$	0.6696±0.0238	0.6744±0.0202	0.6922±0.0166	0.6817±0.0146	0.6795±0.0191	
N_2	0.6705±0.0047	0.6835±0.0042	0.6808±0.0036	0.6795±0.0030	0.6786±0.0039	
M_2	0.6758±0.0009	0.6794±0.0008	0.6800±0.0007	0.6798±0.0006	0.6788±0.0008	0.6907
L_2	0.7174±0.0372	0.6464±0.0369	0.6497±0.0239	0.6261±0.0204	0.6599±0.0305	
S_2	0.6631±0.0020	0.6805±0.0017	0.6776±0.0015	0.6822±0.0012	0.6758±0.0016	
K_2	0.6874±0.0090	0.6739±0.0051	0.6753±0.0049	0.6805±0.0039	0.6793±0.0060	
$\Delta\varphi$, град (север — юг)						
Q_1	-3.4±6.3	-4.6±3.3	-5.3±3.0	-3.5±3.5	-4.2±4.2	
O_1	-4.3±1.2	-5.2±0.6	-3.6±0.5	-3.6±0.6	-4.2±0.8	2.07
M_1	3.9±6.8	-4.7±4.9	-1.2±3.8	-16.3±4.8	-4.6±5.2	
P_1	-1.5±2.3	-3.6±1.6	-1.1±1.3	0.0±1.3	-1.6±1.7	
S_1	46.4±33.3	72.5±111.4	-72.9±37.0	22.2±28.4	17.0±62.6	
K_1	1.1±0.8	0.2±0.5	-0.9±0.4	-0.5±0.4	0.0±0.5	
J_1	2.9±13.2	7.1±9.0	-22.8±12.9	7.6±14.4	-1.3±12.5	
OO_1	29.9±24.0	-8.0±8.4N	-4.0±10.2	-1.9±12.6	5.8±15.1	
$2N_2$	2.8±2.0	2.9±1.7	3.1±1.4	2.8±1.2	1.5±1.6	
N_2	0.9±0.4	1.3±0.4	-0.3±0.3	0.6±0.2	0.6±0.3	
M_2	0.8±0.1	0.6±0.1	0.7±0.1	0.8±0.1	0.7±0.1	1.03
L_2	1.4±3.0	0.0±3.3	-0.3±2.1N	1.6±1.9	0.4±2.6	
S_2	0.6±0.2	1.0±0.1	0.6±0.1	0.9±0.1	0.8±0.1	
K_2	0.6±0.8	1.0±0.4	1.3±0.4	2.0±0.3	1.2±0.5	

Волна O_1

Направление север — юг $h = 0.4662$, $k = 0.2026$, $h/k = 2.301$,
 Направление запад — восток $h = 0.7549$, $k = 0.3920$, $h/k = 1.926$,
 Среднее из двух направлений $h = 0.6106$, $k = 0.2973$, $h/k = 2.054$;

Волна M_2

Направление север — юг $h = 0.6344$, $k = 0.3008$, $h/k = 2.106$,
 Направление запад — восток $h = 0.5852$, $k = 0.2842$, $h/k = 2.059$,
 Среднее из двух направлений $h = 0.6098$, $k = 0.2925$, $h/k = 2.085$.

Мы не вычисляли погрешности полученных нами чисел Лява, поскольку неизвестны ошибки, с которыми определены поправки за влияние дальних зон океанического прилива и за эффект топографии. Качественно о них можно судить, сравнивая значения величин h и k , полученные

Таблица 2. Значения параметров γ и $\Delta\varphi$ (станция Судиевка, запад — восток)

Волны	Прибор				Среднее арифметическое	Исправленное за прилив в океане
	НФОА-19, 07.12.1979— 30.04.1981 гг.	НФО-66, 13.10.1971— 02.08.1973 гг.	НФО-09, 26.01.1971— 21.12.1971 гг.	НФО-09, 16.03.1972— 09.01.1973 гг.		
γ (запад — восток)						
Q_1	0.6519±0.0147	0.6421±0.0107	0.6663±0.0122	0.6468±0.0112	0.6518 ±0.0123	
O_1	0.6462±0.0029	0.6428± 0.0021	0.6423±0.0025	0.6425±0.0023	0.6434±0.0025	0.6471
M_1	0.6375±0.0274	0.6910± 0.0305	0.6397±0.0223	0.6551±0.0321	0.6558±0.0283	
P_1	0.7706±0.0054	0.7740± 0.0049	0.7738±0.0060	0.7760±0.0056	0.7736±0.0055	
S_1	0.8851±0.3313	0.3339±0.2924	0.6948±0.3536	0.4346±0.3310	0.5871 ±0.3278	
K_1	0.7690±0.0020	0.7734±0.0015	0.7719±0.0018	0.7708±0.0017	0.7713 ±0.0018	0.7710
J_1	0.6589±0.0348	0.7280±0.0249	0.7179±0.0291	0.7226±0.0260	0.7068 ±0.0290	
OO_1	0.5770±0.0721	0.7025± 0.0407	0.7210±0.0371	0.6904±0.0443	0.6727±0.0505	
$2N_2$	0.7411±0.0163	0.7277± 0.0143	0.7139±0.0190	0.7332±0.0184	0.7290±0.0171	
N_2	0.7189±0.0032	0.7212±0.0029	0.7169±0.0041	0.7243±0.0039	0.7203 ±0.0036	
M_2	0.7220±0.0006	0.7181±0.0006	0.7194±0.0008	0.7179±0.0008	0.7194 ±0.0007	0.7009
L_2	0.7829±0.0252	0.6629±0.0232	0.6413±0.0334	0.6758±0.0303	0.6907 ±0.0283	
S_2	0.7210±0.0013	0.7223±0.0012	0.7212±0.0017	0.7223±0.0017	0.7217 ±0.0015	
K_2	0.7326±0.0062	0.7236±0.0040	0.7115±0.0050	0.7088±0.0055	0.7191 ±0.0052	
$\Delta\varphi$, град (запад — восток)						
Q_1	1.3±1.3	-1.0±1.0	0.2±1.0	-2.7±1.0	-0.6±1.1	
O_1	-0.9±0.3	-1.0±0.2	-0.8±0.2	-1.3±0.2	-1.0±0.23	-0.61
M_1	-1.0±2.5	3.4±2.5	6.4±2.0	-0.5±2.8	-2.1±2.5	
P_1	-0.3±0.4	-0.7±0.4	-0.1±0.4	-0.8±0.4	-0.5±0.40	
S_1	19.1±21.5	78.0±50.0	-16.1±29.3	-65.4±43.5	3.9±37.8	
K_1	-0.2±0.1	-0.0±0.1	-0.2±0.1	-0.2±0.1	-1.5±0.1	
J_1	0.2±3.0	3.9±2.0	-4.5±2.3	0.2±2.1	-0.1±2.4	
OO_1	-20.1±7.2	-0.9±3.3	-0.4±2.9	-1.6±3.7	-5.8±4.6	
$2N_2$	-5.8±1.3	1.1±1.1	-0.9±1.5	-3.6±1.4	-2.3±1.3	
N_2	-3.7±0.3	-4.3±0.2	-3.4±0.3	-4.7±0.3	-4.0±0.3	
M_2	-4.1±0.1	-3.9±0.0	-3.9±0.1	-4.0±0.1	-4.0±0.1	-1.70
L_2	-10.3±1.8	-5.8±2.0	-3.2±3.0	-5.9±2.6	-6.3±2.4	
S_2	-4.0±0.1	-3.8±0.1	-3.2±0.1	-3.5±0.1	-3.6±0.1	
K_2	-4.7±0.5	-2.5±0.3	-3.4±0.4	-2.1±0.4	-3.2±0.4	

принципиально иными методами. Так, из наблюдений за изменениями скорости вращения Земли [7] получено значение $k = 0.301 \pm 0.004$, из наблюдений искусственных спутников Земли [8] — значение $k = 0.300 \pm 0.001$, и из экстензометрических наблюдений [3] — значение $h = 0.610 \pm 0.027$.

ВЫВОДЫ

1. Существенно повышена точность определяемых амплитуд и фаз приливных волн в сравнении с полученными ранее [4].

2. Определены числа Лява, которые хорошо согласуются с другими оценками.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что для направления север-юг для обеих волн O_1 и M_2 величины h и k занижены, а для направления запад — восток завышены примерно на одинаковую величину. Однозначно объяснить это сегодня невозможно. Причин может быть не-

Таблица 3. Сравнение полученных значений отношения h/k с их теоретическими аналогами для наиболее вероятных моделей внутреннего строения Земли

Волны	h/k (наблюдаемые)	h/k (модельные)			
		Модель I по Молоденскому [11]	Модель II по Молоденскому [11]	Модель 1066A по Вару и РЕМ-С [13]	Модель Дзивонского— Андерсена по Метьёзу и др. [10]
M_2	2.085	2.023	2.023	2.017	2.023
O_1	2.054	2.026	2.047	2.023	2.024

сколько: метеорологические возмущения наблюдаемых наклонов земной поверхности, систематические погрешности в поправках за влияние дальних зон океанического прилива, возможные азимутальные неравенства упругих свойств земной коры.

3. Полученные величины отношений h/k незначительно отличаются от их теоретических аналогов, вычисленных для наиболее вероятных моделей внутреннего строения Земли (табл. 3).

4. Величина наблюдаемого изменения амплитуды волны K_1 , вызываемого близзачным резонансом жидкого ядра, составляет -0.076 , что близко к теоретическому значению.

1. Аксентьева З. М., Баленко В. Г., Булацен В. Г. та ін. Спостереження вертикальної складової сили тяжіння на території України в 1955—1997 рр. // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—Вып. 18.—С. 195—204.
2. Баленко В. Г. Эффект топографии в приливных наклонах на станциях профиля Киев — Артемовск // Вращение и приливные деформации Земли.—1981.—Вып. 13.—С. 3—10.
3. Латынина Л. А. Результаты экстензометрических исследований в геодинамике: Автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. — М., 1985.—37 с.
4. Матвеев П. С., Голубицкий В. Г., Богдан И. Ю. и др. Уточненные значения параметров земного прилива для пунктов профиля Сумы — Херсон // Вращение и приливные деформации Земли.—1977.—Вып. 9.—С. 16—33.
5. Перцев Б. П. Влияние морских приливов ближних зон на земноприливные наблюдения // Изв. АН СССР. Физ. Земли.—1976.—№ 1.—С. 13—22.
6. Перцев Б. П., Иванова М. В. Расчет нагрузочных чисел Лява для земной модели №508 Гильберта и Дзивонского // Изучение земных приливов. — М.: Наука, 1980.—С. 42—47.
7. Пильник Г. П. Астрономические наблюдения земных приливов // Изв. АН СССР. Физ. Земли.—1970.—№ 3.—С. 3—14.
8. Романова Г. В. Определение числа Лява k из лазерных наблюдений искусственных спутников Земли: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. — М., 1984.—14 с.
9. Шляховый В. П., Островский А. Е., Матвеев П. С. Опытные наблюдения наклонов земной поверхности фотоэлектрическими наклономерами автокомпенсационного типа // Вращение и приливные деформации Земли.—1981.—Вып. 13.—С. 13—18.
10. Mathews P. M., Buffett B. A., Shapiro I. I. Love numbers for diurnal tides: Relation to wobble admittances and resonance expansions // J. Geophys. Res.—1995.—100, N 137.—P.
11. Melchior P. The Tides of the Planet Earth. 1983.
12. Venedikov A. P., Arnoso J., Vieira R. Program VAV/2000 for tidal analysis of unevenly spaced data with irregular drift and coloured noise // J. Geodetic Soc. Japan.—2001.—47, N 1.—P. 281—286.
13. Wahr J. M. Body tides on an elliptical, elastic and oceanless Earth // Geophys. J. Roy. Astron. Soc.—1981.—64, N 3.

Поступила в редакцию 27.12.04