

УДК 528.2:629.78+550.388.2

Программное обеспечение «Klio» для определения параметров ионосферы

О. А. Хо́да

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Надійшла до редакції 16.11.99

Наводиться опис програмного забезпечення «Klio», призначеного для визначення параметрів іоносфери з обробки спостережень GPS-спутників. Результати обробки цією програмою даних GPS-спостережень на п'яти пунктах кампанії GEODUC'95 порівнюються з результатами, отриманими за допомогою комплексу Bernese v.3.5.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние ионосферы является одним из основных источников ошибок при проведении наблюдений GPS-спутников. В период повышенной солнечной активности ионосферная рефракция может достигать порядка 50 м [7]. На практике используются линейные комбинации фазовых наблюдений, которые в некотором приближении исключают влияние ионосферы. При этом используется тот факт, что GPS-спутники передают сигналы на двух частотах $L1$ ($f_1 = 1575.42$ МГц) и $L2$ ($f_2 = 1227.60$ МГц). Кроме этого, возможно использование различных моделей ионосферной рефракции. Следовательно, имея наблюдения GPS-спутников, можно решить обратную задачу, то есть, зная координаты некоторых станций, можно построить модель ионосферы над территорией, покрываемой этими станциями.

ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «KLIO»

Программное обеспечение «Klio» предназначено для оценки параметров ионосферы из данных GPS-наблюдений. Данная программа написана на языке программирования Turbo Pascal 6.0 и содержит более 6500 строк.

Условно программу «Klio» можно разбить на следующие блоки:

- блок преобразования входных данных во внутренний формат;
- блок проверки качества данных и определения моментов скачков фаз;
- блок определения параметров ионосферы;
- блок вспомогательных программ.

Последний блок включает подпрограммы различных типов: дополнительные математические функции, квадратно-корневой информационный фильтр (SRIF) [2], подпрограммы преобразования эпох и т. д.

Входными данными служат файлы наблюдений GPS-спутников в формате RINEX [5, 6], точные эфемериды GPS-спутников в формате SP3 [9], объединенные ряды параметров вращения Земли (C04-файлы) [1]. Указанные входные файлы в форматах RINEX и SP3 являются текстовыми файлами, что делает неудобным их быструю обработку. Для записи их в бинарном формате служит блок входных данных.

БЛОК ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ДАННЫХ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ СКАЧКОВ ФАЗ

Во время наблюдений GPS-приемник регистрирует дробную часть фазы биения (т. е. разность между переданной GPS-спутником несущей волной и сигналом-копией, генерируемым приемником). Счет-

чик целых циклов увеличивается на единицу каждый раз, когда фаза изменяется с 2π до 0. Значит, в заданную эпоху наблюдаемая фаза является суммой показателя счетчика целых чисел и дробной части фазы. Начальное целое количество циклов, соответствующее начальному расстоянию между GPS-спутником и GPS-приемником, является неизвестным. Эта фазовая неоднозначность остается постоянной до того момента, пока не будет перерыва в наблюдениях данного спутника. Перерыв в наблюдениях приводит к скачку фазы на целое количество циклов.

Причины, приводящие к скачку фазы, можно разбить на три типа:

- наличие преград на пути распространения сигнала (деревья, строения, горы и т. д.);
- малое отношение уровня сигнала к шуму, вызванное неблагоприятными ионосферными условиями, дополнительными отражениями сигнала, малым углом места GPS-спутника и т. д.;
- сбой программного обеспечения GPS-приемника, приводящий к неправильной обработке сигнала.

Скачок фазы крайне редко может быть вызван и сбоями осциллятора на GPS-спутнике.

Каждый скачок фазы приводит к увеличению числа неизвестных параметров при обработке GPS-наблюдений. Поэтому для корректной обработки данных необходимо знание моментов всех скачков фазы. Для определения этих моментов, а также для маркировки выбросов, и служит данный блок.

Для проверки качества данных и определения моментов скачков фазы в качестве наблюдаемых величин используются линейные комбинации $L3$ и $L4$ [10]. Использование $L4$ предпочтительнее, так как параметры ионосферы оцениваются при обработке именно этой комбинации, но в случае экстремальных ионосферных условий лучше использовать $L3$.

В данном блоке проверяется, можно ли фазовые наблюдения представить полиномом степени Q ($Q \leq 2$) на определенном отрезке времени, содержащем $Q + 2$ эпохи наблюдений.

На первом шаге проводится процесс инициализации. Берутся первые $Q+2$ наблюдения. Если $Q + 1$ -я производная интерполяционного полинома, аппроксимирующего эти наблюдения, равна нулю в пределах 3σ , где σ — погрешность аппроксимации, определяемая точностью единичного наблюдения, то процесс инициализации завершен успешно, и первому наблюдению из проверяемого ряда присваивается флаг «скачок фазы». Иначе первое наблюдение рассматривается как выброс и маркируется. Тестируемый интервал сдвигается на одну эпоху, и процесс инициализации повторяется до успешного

завершения. После этого опять тестируемый интервал сдвигается на одну эпоху наблюдения, и опять проверяется на равенство нулю в пределах 3σ $Q + 1$ -я производная полинома для нового ряда наблюдений. Если это условие выполняется, то $Q + 2$ -е наблюдение из этого ряда принимается, и тестируемый интервал снова сдвигается на одну эпоху. Данный процесс повторяется до тех пор, пока рассматриваемая производная превысит 3σ . В этом случае последнее наблюдение из тестируемого ряда маркируется, а его место занимает наблюдение в следующую эпоху. Замаркированное наблюдение трактуется как выброс. В случае, когда временной интервал между эпохами, соответствующими $Q+1$ -му и $Q+2$ -му наблюдениям в рассматриваемом ряду, превысит задаваемый интервал ΔT , выбирается новый ряд наблюдений, в котором первым становится $Q+2$ -е наблюдение из предыдущего ряда. Происходит процесс реинициализации, после успешного завершения которого осуществляется обратный ход для снятия маркировки с наблюдений, ошибочно принятых за выбросы. Самому раннему восстановленному наблюдению присваивается флаг «скачок фазы».

Входными параметрами являются

- тип линейной комбинации ($L3$ или $L4$),
- степень полинома Q ($Q \leq 2$),
- интервал времени ΔT ,
- ошибка единичного наблюдения.

Минимальное значение интервала ΔT определяется из соотношения

$$\Delta T = (Q + 2)T_{\text{obs}},$$

где T_{obs} — интервал наблюдений. Максимальное значение ΔT равно 10 мин. Значение ошибки единичного наблюдения может быть взято из интервала $0.01 \div 0.10$ м [11].

БЛОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

В данном блоке параметры ионосферы оцениваются в рамках модели тонкого слоя. Эта модель основывается на предположении, что все свободные электроны находятся на сферическом бесконечно тонком слое на некоторой высоте h_{ion} над земной поверхностью (рис. 1). Данная модель не является точной моделью ионосферы. Во-первых, рассматривается зависимость параметров ионосферы только от положения Солнца (местного солнечного времени). Во-вторых, модель тонкого слоя может быть названа моделью «замороженной» ионосферы. Ионосфера представляется как сферический слой с выпуклостью, движущийся над поверхностью Зем-

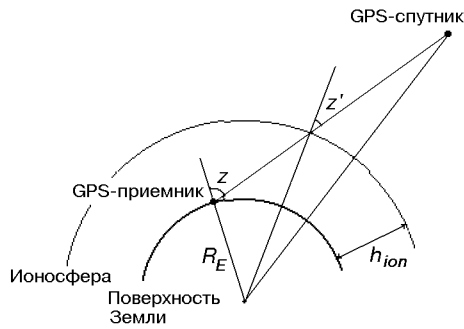


Рис. 1. Графическое представление модели тонкого слоя

ли синхронно с движением Солнца по небесной сфере. В-третьих, изменения со временем внутри ионосферы в модели тонкого слоя не рассматриваются.

Уравнения фазовых наблюдений можно записать в виде [12]:

$$\rho_R^S + \Delta\rho^{\text{tropo}} + \Delta\rho_1^{\text{ion}} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + N_1 \cdot \lambda_1 - \Phi_1 = v_1, \quad (1)$$

$$\rho_R^S + \Delta\rho^{\text{tropo}} + \Delta\rho_2^{\text{ion}} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + N_2 \cdot \lambda_2 - \Phi_2 = v_2, \quad (2)$$

где ρ_R^S — геометрическое расстояние между GPS-спутником и GPS-приемником; $\Delta\rho^{\text{tropo}}$ — тропосферная рефракция; $\Delta\rho_1^{\text{ion}}, \Delta\rho_2^{\text{ion}}$ — ионосферные рефракции; Δt^S — ошибка часов GPS-спутника; Δt_R — ошибка часов GPS-приемника; N_1, N_2 — фазовые неоднозначности; λ_1, λ_2 — длины волн несущих частот $L1$ и $L2$; Φ_1, Φ_2 — фазовые наблюдения (в метрах); v_1, v_2 — остатки плюс немоделируемые ошибки; c — скорость света. Формируем фазовую комбинацию $L4$:

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (3)$$

Подставляем (1), (2) в (3):

$$(\Delta\rho_1^{\text{ion}} - \Delta\rho_2^{\text{ion}}) + (N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2) - \Phi_4 = v_4, \quad (4)$$

где $v_4 = v_1 - v_2$.

Ионосферная рефракция на частоте f_j представима в виде [8]:

$$\Delta\rho_j^{\text{ion}} = \pm \frac{C^{\text{ion}}}{f_j^2} TEC, \quad (5)$$

где

$$TEC = \int_0^r N_e dr \quad C^{\text{ion}} = e^2 / (8\pi^2 \epsilon_0 m_e),$$

— общее содержание электронов вдоль линии распространения сигнала (total electron

content); e — заряд электрона; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства; m_e — масса электрона; N_e — концентрация свободных электронов. Знак «+» используется для кодовых наблюдений, а знак «-» — для фазовых. В данном уравнении учитываются только члены, обратно пропорциональные f_j^2 .

Уравнение (5) может быть записано в виде

$$\Delta\rho_j^{\text{ion}} = \pm \frac{C^{\text{ion}}}{f_j^2} TVEC \frac{1}{\cos z'}, \quad (6)$$

где $TVEC$ — общее содержания электронов в зените; $M(z)$ — коэффициент наклонения; z — зенитное расстояние GPS-спутника.

Простейший вид коэффициента наклонения:

$$M(z) = \frac{1}{\cos z'},$$

где

$$\sin z' = \frac{R_E}{R_E + h_{\text{ion}}} \sin z$$

(рис. 1); R_E — средний радиус Земли. Так как значения фазовых неоднозначностей N_1 и N_2 в данном контексте нас не интересуют, то введем обозначение

$$N_4 = N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2. \quad (7)$$

Подставим (6) в (4) с учетом (7):

$$- \frac{C^{\text{ion}}}{\cos z'} TVEC \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + N_4 - \Phi_4 = v_4. \quad (8)$$

$TVEC$ моделируется в виде разложения Тейлора по географической широте φ и часовому углу s Солнца:

$$TVEC(\varphi, s) = \sum_{i=0}^{i_{\text{max}}} \sum_{k=0}^{k_{\text{max}}} E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (s - s_0)^k, \quad (9)$$

где

$$E_{ik} = \frac{1}{i!k!} \left. \frac{\partial^{i+k} TVEC}{\partial \varphi^i \partial s^k} \right|_{\varphi_0, s_0} \quad (10)$$

$i = 0 \dots i_{\text{max}}, k = 0 \dots k_{\text{max}}, \varphi_0, s_0$ — точка разложения. Часовой угол Солнца — угол между Солнцем и местным меридианом (положительный на запад). Местное солнечное время связано с часовым углом Солнца соотношением:

$$t_{\text{Sun}} = s + 12^h.$$

В данном алгоритме s_0 — часовой угол Солнца, соответствующий середине интервала наблюдений, φ_0 — среднее значение широт всех GPS-пунктов, используемых для вычисления модели.

Подставим (9) в (8):

$$-\frac{C_{\text{ion}}}{\cos z} \sum_{i=0}^{i_{\text{max}}} \sum_{k=0}^{k_{\text{max}}} E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (s - s_0)^k \times \\ \times \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + N_4 - \Phi_4 = v_4$$

Это уравнение линейно по отношению к неизвестным параметрам E_{ik} и константе N_4 . Эти неизвестные параметры оцениваются рекурсивно с помощью квадратно-корневого информационного фильтра SRIF [2].

Выбор оптимальных максимальных степеней разложения Тейлора зависит от поведения ионосферы во времени и пространстве. Однако слишком большие значения степеней уменьшают реальность оцениваемых параметров. Наилучшие значения степеней разложения [12]:

- 1÷2 для широты и
- 2÷4 для часового угла Солнца,

если модель строится на четырехчасовом интервале наблюдений на территории, не превышающей по размерам континент. Максимальная степень разложения по часовому углу Солнца больше максимальной степени разложения по широте, так как в модели тонкого слоя территория, покрываемая по долготе, гораздо больше, чем территория, покрываемая по широте.

Входными параметрами для данного блока являются

- высота тонкого слоя $h_{\text{ion}} = 300 \div 400$ км;
- количество GPS-пунктов, используемых для вычисления модели;
- степени разложения по часовому углу Солнца, по широте и для смешанных членов;
- минимальный угол места GPS-спутников $\pi/2 - z$;
- тип коэффициента наклона $M(z)$;
- нормирующие множители для часового угла Солнца, широты и общего содержания электронов.

Результаты оценки параметров ионосферы по модели тонкого слоя не очень чувствительны к выбору высоты h_{ion} . Например, использование моделей тонкого слоя с высотами h_{ion} , отличающимися на 100 км, при определении координат пунктов наблюдений приводит к относительному изменению длин полученных баз приблизительно на $0.04 \cdot 10^{-6}$ [4].

ТЕСТОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки работоспособности программного обеспечения «Klio» были обработаны наблюдения

Таблица 1. Сессии GPS-кампании GEODUC'95, которые использовались для тестирования работоспособности программы «Klio»

Сессия	2621	2631	2641	2651
BERG	—	—	21.09 7:54:15 22.09 4:38:15	22.09 16:52:45 23.09 6:55:15
LVIV	19.09 7:00:15 20.09 3:31:00	20.09 7:00:15 21.09 3:48:00	21.09 7:00:15 22.09 3:46:30	22.09 7:00:15 23.09 3:47:45
MORN	19.09 7:00:15 20.09 2:30:15	20.09 18:15:30 21.09 6:00:00	21.09 7:00:15 22.09 3:10:30	22.09 7:00:15 23.09 3:05:15
SEMN	19.09 7:00:15 20.09 2:00:15	20.09 6:51:15 21.09 1:55:00	21.09 7:00:15 22.09 2:00:00	22.09 6:56:45 23.09 2:02:15
UZHD	19.09 6:59:30 20.09 2:04:30	20.09 7:00:15 21.09 2:03:00	—	—

GPS-спутников, проходившие в рамках GPS-кампании GEODUC'95 [3]. Те же наблюдения были обработаны комплексом «Bernese v.3.5» [11] с теми же входными параметрами. Это позволило сравнить полученные результаты и оценить качество работы программы «Klio».

В табл. 1 приведены пункты и сессии наблюдений, использовавшиеся при данной обработке. Среди выбранных пунктов есть пункты как с хорошими условиями наблюдений (LVIV, SEMN, UZHD), так и с ограниченной видимостью спутников (MORN).

При проверке качества фазовых наблюдений использовались следующие входные параметры:

- тип линейной комбинации $L4$;
- степень полинома $Q = 1$;
- интервал времени $\Delta T = 120$ с;
- ошибка единичного наблюдения 0.010 м.

Результаты проверки, выполненные программой «Klio», приведены в табл. 2, а в табл. 3 показан более подробный отчет для пункта LVIV, сессия 2621. Точно такие же результаты были получены при использовании комплекса «Bernese v.3.5».

Модели тонкого слоя строились в основном на четырехчасовых интервалах времени наблюдений с использованием данных с одного (LVIV), двух

Таблица 2. Результаты проверки качества фазовых наблюдений программой «Klio»

Станция	Сессия	Количество скачков фаз	Количество выбросов
BERG	2641	115	21
	2651	93	24
LVIV	2621	59	12
	2631	58	16
	2641	63	15
	2651	70	17
MORN	2621	130	37
	2631	81	13
	2641	116	15
	2651	132	20
SEMN	2621	43	2
	2631	46	1
	2641	49	0
	2651	49	3
UZHD	2621	116	13
	2631	97	12

Таблица 3. Подробные результаты проверки качества фазовых наблюдений программой «Klio» для пункта LVIV, сессия 2621

GPS-спутник	Скачки фазы, номера эпох	Выбросы, номера эпох	Количество скачков фазы	Количество выбросов
PRN 1	274, 290, 3881, 4533, 4559	—	5	0
PRN 2	2576, 3774, 3792	—	3	0
PRN 4	1482, 3847	4639, 4640	2	2
PRN 5	3520, 3542	3536	2	1
PRN 6	4219	—	1	0
PRN 7	1000, 1653, 3132	1696, 1697, 1710	3	3
PRN 9	3243	—	1	0
PRN 12	2762	—	1	0
PRN 14	744, 759	—	2	0
PRN 15	386, 1713	—	2	0
PRN 16	2222, 3321, 4856	—	3	0
PRN 17	1, 4804, 4826	—	3	0
PRN 18	1371	—	1	0
PRN 19	1866	—	1	0
PRN 20	3950	—	1	0
PRN 21	1	—	1	0
PRN 22	1, 1892, 2039, 2295, 2312	—	5	0
PRN 23	1, 3244, 3664	659, 660, 3657	3	3
PRN 24	1801, 4008, 4032	—	3	0
PRN 25	977, 4422	—	2	0
PRN 26	1, 32, 65, 93, 2754, 3949	76	6	1
PRN 27	2055	—	1	0
PRN 28	1	—	1	0
PRN 29	1146	—	1	0
PRN 31	1, 1120, 2825, 2885, 2919	3062, 3063	5	2
Всего			59	12

Таблица 4. Модель ионосферы LVIV2626. (Станция LVIV. Центр разложения — 49.9177° с. ш., 23.9542° в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	«Klio»	«Bernese»
Количество эпох			960	960
Количество наблюдений			5402	3310
Среднее квадратичное отклонение, м			0.057	0.057
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0.8602	0.8706
	0	1	-0.0382	-0.0375
	0	2	0.0686	0.0686
	1	0	-0.1923	-0.1953
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	1	1	-0.0128	-0.0101
	0	0	0.0029	0.0030
	0	1	0.0011	0.0011
	0	2	0.0016	0.0016
Количество использованных скачков фазы	1	0	0.0013	0.0014
	1	1	0.0017	0.0018
			14	13
Количество неиспользованных скачков фазы			2	3

Таблица 5. Модель ионосферы LVSE2626. (Станция LVIV, SEMN. Центр разложения — 49.2269° с. ш., 23.4910° в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	«Klio»	«Bernese»
Количество эпох			1920	1920
Количество наблюдений			10942	10688
Среднее квадратичное отклонение, м			0.062	0.061
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0.8757	0.8874
	0	1	-0.0525	-0.0504
	0	2	0.0476	0.0482
	1	0	-0.1893	-0.1965
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	1	1	0.0033	0.0039
	0	0	0.0022	0.0023
	0	1	0.0008	0.0008
	0	2	0.0013	0.0013
Количество использованных скачков фазы	1	0	0.0010	0.0010
	1	1	0.0013	0.0014
			28	27
Количество неиспользованных скачков фазы			3	4

(LVIV, SEMN), трех (LVIV, SEMN, MORN или LVIV, SEMN, UZHD) и четырех (LVIV, SEMN, MORN, UZHD) GPS-пунктов. Используемые входные параметры:

- высота тонкого слоя $h_{\text{тон}} = 350$ км
- степени разложения
 - по часовому углу Солнца 2
 - по широте 1
 - для смешанных членов 2

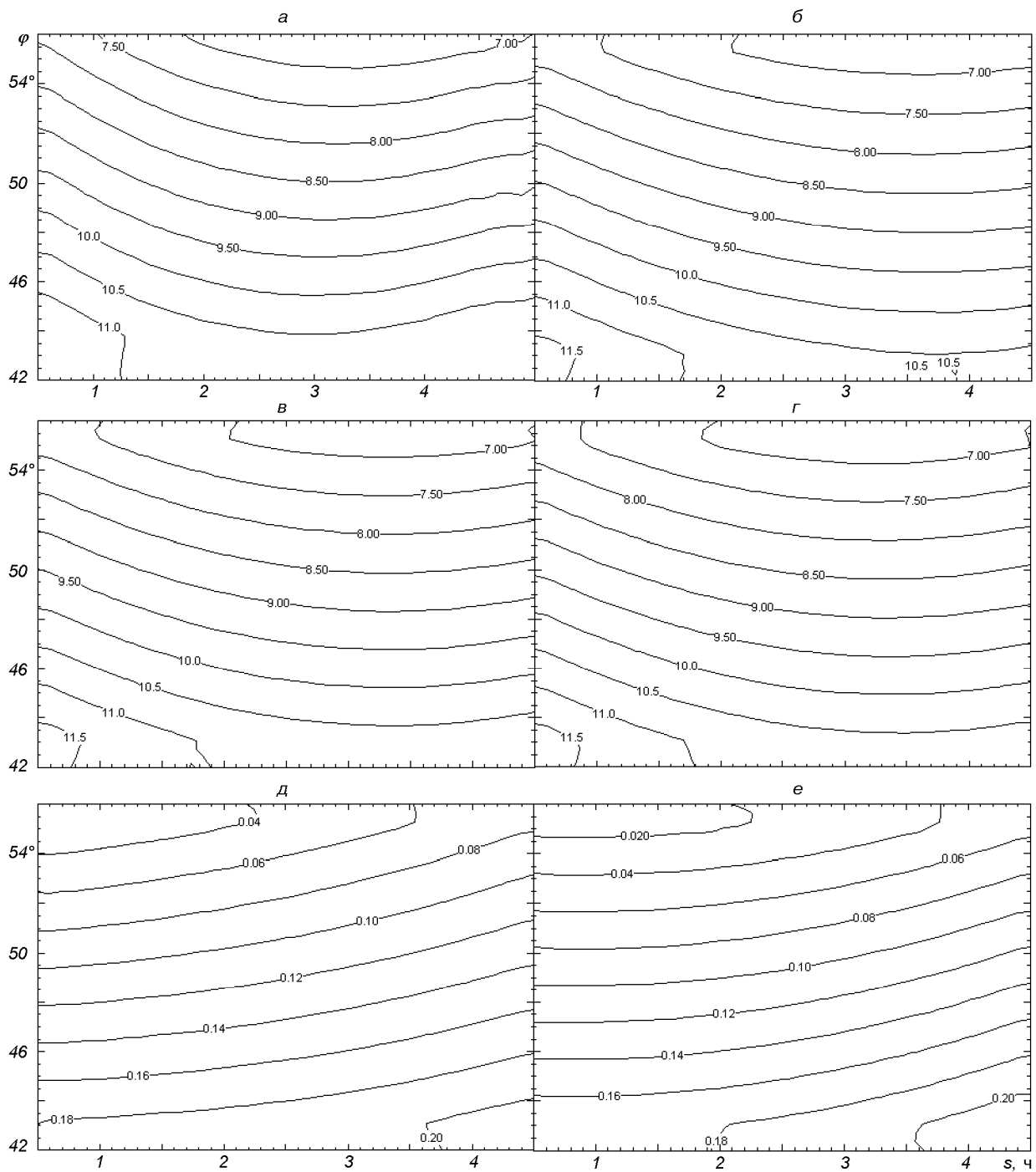


Рис. 2. Модели ионосферы (*TVEC*, *TEGU*), полученные с помощью программы «Klio»: *а* — LVIV2626, *б* — LVSE2626, *в* — LMS_2626, *г* — LMSU2626, а также разности между TEC, полученными с помощью программ «Bernese v.3.5» и «Klio»: *д* — для модели LVSE2626, *е* — для модели LMSU2626

— минимальный угол места
GPS-спутников 15° ;
— тип коэффициента наклона $M(z) = 1/(\cos z')$;
— нормирующие множители

для часового угла Солнца 2 ч,
для широты 6° ,
для общего содержания
электронов $10 \text{ TECU} = 10^{17} \text{ электронов/м}^2$.

Таблица 6. Модель ионосферы LMS_2626. (Станции LVIV, MORN, SEMN. Центр разложения — 49.1965° с. ш., 23.6256° в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	«Klio»	«Bernese»
Количество эпох			2880	2880
Количество наблюдений			16284	15927
Среднее квадратичное отклонение, м			0.060	0.058
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0.8797	0.8904
	0	1	-0.0408	-0.0389
	0	2	0.0537	0.0548
	1	0	-0.1936	-0.2009
	1	1	0.0007	0.0010
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	0	0	0.0018	0.0019
	0	1	0.0007	0.0007
	0	2	0.0010	0.0010
	1	0	0.0008	0.0009
	1	1	0.0011	0.0012
Количество использованных скачков фазы			56	53
Количество неиспользованных скачков фазы			9	12

Таблица 7. Модель ионосферы LMSU2626. (Станции LVIV, MORN, SEMN, UZHD. Центр разложения — 49.0381° с. ш., 23.3324° в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	Klio	Bernese
Количество эпох			3840	3840
Количество наблюдений			21807	21301
Среднее квадратичное отклонение, м			0.060	0.059
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0.8767	0.8871
	0	1	-0.0425	-0.0404
	0	2	0.0543	0.0556
	1	0	-0.1944	-0.2025
	1	1	0.0052	0.0052
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	0	0	0.0016	0.0016
	0	1	0.0006	0.0006
	0	2	0.0009	0.0009
	1	0	0.0007	0.0007
	1	1	0.0010	0.0010
Количество использованных скачков фазы			72	67
Количество неиспользованных скачков фазы			17	22

Некоторые полученные модели приведены в табл. 4—7 и на рис. 2, а—г. Значения коэффициентов разложения в ряд Тейлора, полученные обеими программами, довольно близки, и различия между моделями, построенными с использованием этих коэффициентов, невелики (рис. 2, д, е).

На рис. 3, а показано изменение общего содержа-

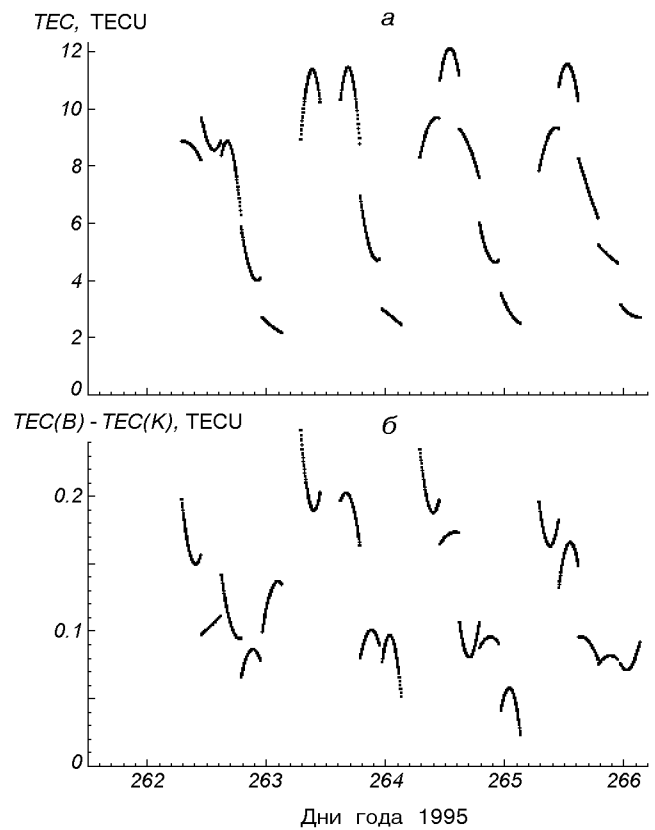


Рис. 3. Содержание электронов в зените над пунктом LVIV: а — общее содержание, полученное с помощью программы «Klio», б — разности между TEC, полученными с помощью программ «Bernese v.3.5» и «Klio»

ния электронов над пунктом LVIV во время проведения кампании GEODUC'95, полученное по моделям, рассчитаным программой «Klio».

Как видно из рис. 3, б, разности между TEC для этого пункта, полученными обеими программами, не превышает 0.25 TECU. Следует заметить, что средняя точность определения TEC при использовании модели тонкого слоя составляет 3÷4 TECU для GPS-пунктов в средних широтах [12].

ВЫВОДЫ

Программное обеспечение «Klio» может быть использовано для оценки параметров ионосферы из данных GPS-наблюдений.

Оценка параметров ионосферы, полученная программой «Klio», находится в удовлетворительной согласии с результатами, полученными с помощью комплекса «Bernese v.3.5».

Автор выражает благодарность И. Ю. Гайовичу за консультации и ценные советы.

1. 1997 IERS Annual Report. Observatoire de Paris, 1998.
2. Bierman G. J. Factorization methods for diskrete sequential estimation. — New York: Acad. press, 1977.—241 p.
3. Gaiovitch I., Khoda O., Samoilenko A., Yatskiv Ya. GEODUC'95 GPS campaign data processing. comparisons to zero data Epoch ('93) // Proc. of the 4th International Seminar "GPS in Central Europe", Penc, 7–9 May 1997 // Reports on Geodesy.—1997.—N 4(27).—P. 351–362.
4. Georgiadiou Y. Ionospheric delay modelling for GPS relative positioning // Proc. of the Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Ottawa. — Canada, 1990.—P. 403–410.
5. Gurtner W. RINEX: The receiver-independent exchange format // GPS World.—1994.—5, N 7.—P. 48–52.
6. Gurtner W., Mader G. Receiver independent exchange format version 2 // GPS Bulletin.—1990.—3, N 3.—P. 1–8.
7. Langley R. B. The GPS error budget // GPS World.—1997.—8, N 3.—P. 51–56.
8. Millman G. H. Ionospheric electron content effects on Earth-space radio propagation. A Review // Proc. of the International Beacon Satellite Symposium.—1979.—P. 323–339.
9. Remondi B. W. Extended the national geodetic survey standard GPS orbit formats // NOAA Technical Report NOS 133 NGS46.—November 1989.—P. 1–85.
10. Rothacher M. Orbits of Satellite Systems in Space Geodesy // Geodatisch-geophysikalische Arbeit in der Schweiz.—1992.—Vol. 46.
11. Rothacher M., Beutler G., Gurtner W., et al. Bernese GPS software version 3.4. — Documentation. 1993.
12. Wild U. Ionosphere and geodetic satellite systems: Permanent GPS tracking data for modelling and monitoring // Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz.—1994.—Vol. 48.

KLIO SOFTWARE FOR THE ESTIMATION OF THE IONOSPHERIC PARAMETERS

O. Khoda

Description of the Klio software intended for the estimation of ionospheric parameters from the GPS observations is presented. Results of the processing of the GPS observations at five GEODUC'95 sites obtained with Klio are compared with the results obtained with the Bernese GPS Software v.3.5.